

Norma Portuguesa

NP
EN 1993-1-9
2010

Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço **Parte 1-9: Fadiga**

Eurocode 3 – Calcul des structures en acier
Partie 1-9: Fatigue

Eurocode 3 – Design of steel structures
Part 1-9: Fatigue

ICS
91.010.30; 91.080.10

DESCRIPTORES
Eurocódigos; estruturas; estruturas de aço; aços; fadiga; ensaios de fadiga; tensão; capacidade de carga; cálculos matemáticos

CORRESPONDÊNCIA
Versão portuguesa da EN 1993-1-9:2005 + AC:2009

HOMOLOGAÇÃO
Termo de Homologação n.º 66/2010, de 2010-03-17
A presente Norma resulta da revisão da
NP ENV 1993-1-1:1998

ELABORAÇÃO
CT 115 (LNEC)

EDIÇÃO
Março de 2010

CÓDIGO DE PREÇO
XEC012

© IPQ reprodução proibida

Instituto Português da  Qualidade

Rua António Gião, 2
2829-513 CAPARICA PORTUGAL
Tel. + 351-212 948 100 Fax + 351-212 948 101
E-mail: ipq@mail.ipq.pt Internet: www.ipq.pt

Preâmbulo nacional

À Norma Europeia EN 1993-1-9:2005, foi dado estatuto de Norma Portuguesa em 2005-08-16 (Termo de Adopção nº 1160/2005, de 2005-08-16).

A presente Norma substitui a NP ENV 1993-1-1:1998 e constitui a versão portuguesa da EN 1993-1-9:2005 + AC:2009, a qual faz parte de um conjunto de normas integrantes do Eurocódigo 3: Projecto de estruturas de aço.

Esta Norma constitui a Parte 1-9 do Eurocódigo 3 e apresenta métodos para a avaliação da resistência à fadiga de elementos, ligações e juntas sujeitos a um carregamento de fadiga.

A aplicação desta Norma em Portugal deve obedecer às disposições constantes do respectivo Anexo Nacional NA, que dela faz parte integrante. Neste Anexo são nomeadamente concretizadas as prescrições explicitamente deixadas em aberto no corpo do Eurocódigo para escolha nacional, denominadas Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP).

Versão portuguesa

Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço
Parte 1-9: Fadiga

Eurocode 3 – Bemessung und
Konstruktion von Stahlbauten
Teil 1-9: Ermüdung

Eurocode 3 – Calcul des
structures en acier
Partie 1-9: Fatigue

Eurocode 3 – Design of steel
structures
Part 1-9: Fatigue

A presente Norma é a versão portuguesa da Norma Europeia EN 1993-1-9:2005 + AC:2009 e tem o mesmo estatuto que as versões oficiais. A tradução é da responsabilidade do Instituto Português da Qualidade. Esta Norma Europeia e a sua Errata foram ratificadas pelo CEN em 2004-04-23 e 2009-04-01, respectivamente.

Os membros do CEN são obrigados a submeter-se ao Regulamento Interno do CEN/CENELEC que define as condições de adopção desta Norma Europeia, como norma nacional, sem qualquer modificação.

Podem ser obtidas listas actualizadas e referências bibliográficas relativas às normas nacionais correspondentes junto do Secretariado Central ou de qualquer dos membros do CEN.

A presente Norma Europeia existe nas três versões oficiais (alemão, francês e inglês). Uma versão noutra língua, obtida pela tradução, sob responsabilidade de um membro do CEN, para a sua língua nacional, e notificada ao Secretariado Central, tem o mesmo estatuto que as versões oficiais.

Os membros do CEN são os organismos nacionais de normalização dos seguintes países: Alemanha, Áustria, Bélgica, Chipre, Dinamarca, Eslováquia, Eslovénia, Espanha, Estónia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Letónia, Lituânia, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Baixos, Polónia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suécia e Suíça.

CEN

Comité Européen de Normalization
Europäisches Komitee für Normung
Comité Européen de Normalisation
European Committee for Standardization

Secretariado Central: Avenue Marnix 17, B-1000 Bruxelas

Sumário	Página
Preâmbulo nacional.....	2
Preâmbulo	6
Antecedentes do programa dos Eurocódigos.....	6
Estatuto e campo de aplicação dos Eurocódigos	7
Normas nacionais de implementação dos Eurocódigos.....	8
Ligações entre os Eurocódigos e as especificações técnicas harmonizadas (EN e ETA) relativas aos produtos.....	8
Anexo Nacional da EN 1993-1-9	8
1 Generalidades.....	9
1.1 Objectivo e campo de aplicação	9
1.2 Referências normativas.....	9
1.3 Termos e definições.....	10
1.3.1 Generalidades	10
1.3.2 Parâmetros do carregamento de fadiga	10
1.3.3 Resistência à fadiga	12
1.4 Símbolos	12
2 Requisitos básicos e métodos	13
3 Métodos de verificação.....	13
4 Tensões resultantes das acções de fadiga.....	15
5 Cálculo das tensões	16
6 Cálculo dos intervalos de tensão.....	17
6.1 Generalidades	17
6.2 Valor de cálculo da amplitude de tensão nominal	17
6.3 Valor de cálculo da amplitude de tensão nominal modificada	17
6.4 Valor de cálculo do intervalo de tensões para ligações soldadas de secções tubulares	18
6.5 Valor de cálculo do intervalo de tensões para a tensão geométrica (na zona termicamente afectada)	18
7 Resistência à fadiga	18
7.1 Generalidades	18
7.2 Modificações da resistência à fadiga	21
7.2.1 Pormenores não soldados ou soldados com relaxação de tensões em compressão	21
7.2.2 Efeito de escala.....	22
8 Verificação em relação à fadiga.....	22

Anexo A (normativo) Determinação dos parâmetros do carregamento de fadiga e dos formatos de verificação	38
A.1 Determinação dos casos de carregamento	38
A.2 Historial de tensões para o pormenor construtivo	38
A.3 Contagem dos ciclos.....	38
A.4 Espectro dos intervalos de tensão.....	38
A.5 Ciclos até à rotura.....	39
A.6 Formatos de verificação	39
Anexo B (normativo) Resistência à fadiga em função da tensão geométrica (na zona termicamente afectada)	41
Anexo Nacional NA	43
Introdução.....	43
NA.1 – Objectivo e campo de aplicação.....	43
NA.2 – Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP)	43
NA.2.1 – Generalidades	43
NA.2.2 – Regras de Aplicação sem prescrições a nível nacional.....	43
NA.2.3 – Regras de Aplicação com prescrições a nível nacional	44
NA.3 – Informações complementares	44
NA.3.1 – Objectivo	44
NA.3.2 – Informações gerais	44
NA.4 – Correspondência entre as normas europeias referidas na presente Norma e as normas nacionais.....	44

Preâmbulo

A presente Norma foi elaborada pelo Comité Técnico CEN/TC 250 "*Structural Eurocodes*", cujo secretariado é assegurado pela BSI. O CEN/TC 250 é responsável por todos os Eurocódigos Estruturais.

A esta Norma Europeia deve ser atribuído o estatuto de Norma Nacional, seja por publicação de um texto idêntico, seja por adopção, o mais tardar em Novembro de 2005, e as normas nacionais divergentes devem ser anuladas o mais tardar em Março de 2010.

A presente Norma substitui a ENV 1993-1-1.

De acordo com o Regulamento Interno do CEN/CENELEC, a presente Norma Europeia deve ser implementada pelos organismos nacionais de normalização dos seguintes países: Alemanha, Áustria, Bélgica, Chipre, Dinamarca, Eslováquia, Eslovénia, Espanha, Estónia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Letónia, Lituânia, Luxemburgo, Malta, Noruega, Países Baixos, Polónia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suécia e Suíça.

Antecedentes do programa dos Eurocódigos

Em 1975, a Comissão da Comunidade Europeia optou por um programa de acção na área da construção, baseado no artigo 95º do Tratado. O objectivo do programa era a eliminação de entraves técnicos ao comércio e a harmonização das especificações técnicas.

No âmbito deste programa de acção, a Comissão tomou a iniciativa de elaborar um conjunto de regras técnicas harmonizadas para o projecto de obras de construção, as quais, numa primeira fase, serviriam como alternativa para as regras nacionais em vigor nos Estados-Membros e que, posteriormente, as substituiriam.

Durante quinze anos, a Comissão, com a ajuda de uma Comissão Directiva com representantes dos Estados-Membros, orientou o desenvolvimento do programa dos Eurocódigos, que conduziu à primeira geração de regulamentos europeus na década de 80.

Em 1989, a Comissão e os Estados-Membros da UE e da EFTA decidiram, com base num acordo¹⁾ entre a Comissão e o CEN, transferir, através de uma série de mandatos, a preparação e a publicação dos Eurocódigos para o CEN, tendo em vista conferir-lhes no futuro a categoria de Norma Europeia (EN). Tal, *de facto*, os Eurocódigos às disposições de todas as directivas do Conselho e/ou decisões da Comissão em matéria de normas europeias (por exemplo, a Directiva 89/106/CEE do Conselho relativa a produtos de construção – DPC – e as Directivas 93/37/CEE, 92/50/CEE e 89/440/CEE do Conselho relativas a obras públicas e serviços, assim como as Directivas da EFTA equivalentes destinadas à instituição do mercado interno).

O programa relativo aos Eurocódigos Estruturais inclui as seguintes normas, cada uma das quais é, geralmente, constituída por diversas Partes:

EN 1990	Eurocódigo:	Bases para o projecto de estruturas
EN 1991	Eurocódigo 1:	Acções em estruturas
EN 1992	Eurocódigo 2:	Projecto de estruturas de betão
EN 1993	Eurocódigo 3:	Projecto de estruturas de aço
EN 1994	Eurocódigo 4:	Projecto de estruturas mistas aço-betão

¹⁾ Acordo entre a Comissão das Comunidades Europeias e o Comité Europeu de Normalização (CEN) relativo ao trabalho sobre os Eurocódigos para o projecto de edifícios e de outras obras de engenharia civil (BC/CEN/03/89).

EN 1995	Eurocódigo 5: Projecto de estruturas de madeira
EN 1996	Eurocódigo 6: Projecto de estruturas de alvenaria
EN 1997	Eurocódigo 7: Projecto geotécnico
EN 1998	Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos
EN 1999	Eurocódigo 9: Projecto de estruturas de alumínio

Os Eurocódigos reconhecem a responsabilidade das autoridades regulamentadoras de cada Estado-Membro e salvaguardaram o seu direito de estabelecer os valores relacionados com questões de regulamentação da segurança, a nível nacional, nos casos em que estas continuem a variar de Estado para Estado.

Estatuto e campo de aplicação dos Eurocódigos

Os Estados-Membros da UE e da EFTA reconhecem que os Eurocódigos servem de documentos de referência para os seguintes efeitos:

- como meio de comprovar a conformidade dos edifícios e de outras obras de engenharia civil com as exigências essenciais da Directiva 89/106/CEE do Conselho, em particular a Exigência Essencial n.º 1 – Resistência mecânica e estabilidade – e a Exigência Essencial n.º 2 – Segurança contra incêndio;
- como base para a especificação de contratos de trabalhos de construção e de serviços de engenharia a eles associados;
- como base para a elaboração de especificações técnicas harmonizadas para os produtos de construção (EN e ETA).

Os Eurocódigos, dado que dizem respeito às obras de construção, têm uma relação directa com os documentos interpretativos²⁾ referidos no artigo 12º da DPC, embora sejam de natureza diferente das normas harmonizadas relativas aos produtos³⁾. Por conseguinte, os aspectos técnicos decorrentes dos Eurocódigos devem ser considerados de forma adequada pelos Comitês Técnicos do CEN e/ou pelos Grupos de Trabalho da EOTA envolvidos na elaboração das normas relativas aos produtos, tendo em vista a obtenção de uma compatibilidade total destas especificações técnicas com os Eurocódigos.

Os Eurocódigos fornecem regras comuns de cálculo estrutural para a aplicação corrente no projecto de estruturas e dos seus componentes, de natureza quer tradicional quer inovadora. Elementos construtivos ou condições de cálculo não usuais não são especificamente incluídos, devendo o projectista, nestes casos, assegurar o apoio especializado necessário.

²⁾ De acordo com o n.º 3 do artigo 3º da DPC, as exigências essenciais (EE) traduzir-se-ão em documentos interpretativos que estabelecem as ligações necessárias entre as exigências essenciais e os mandatos para a elaboração de normas europeias (EN) harmonizadas e guias de aprovação técnica europeia (ETAG), e das próprias aprovações técnicas europeias (ETA).

³⁾ De acordo com o artigo 12º da DPC, os documentos interpretativos devem:

- a) concretizar as exigências essenciais harmonizando a terminologia e as bases técnicas e indicando, sempre que necessário, classes ou níveis para cada exigência;
 - b) indicar métodos de correlação entre essas classes ou níveis de exigências e as especificações técnicas, por exemplo, métodos de cálculo e de ensaio, regras técnicas de concepção de projectos, etc.;
 - c) servir de referência para o estabelecimento de normas europeias harmonizadas e de guias de aprovação técnica europeia.
- Os Eurocódigos, de facto, desempenham um papel semelhante na área da EE 1 e de uma parte da EE 2.

Normas nacionais de implementação dos Eurocódigos

As normas nacionais de implementação dos Eurocódigos incluirão o texto completo do Eurocódigo (incluindo anexos), conforme publicado pelo CEN, o qual poderá ser precedido de uma página de título e de um preâmbulo nacionais, e ser também seguido de um Anexo Nacional.

O Anexo Nacional só poderá conter informações sobre os parâmetros deixados em aberto no Eurocódigo para escolha nacional, designados por Parâmetros Determinados a nível Nacional, a utilizar no projecto de edifícios e de outras obras de engenharia civil no país em questão, nomeadamente:

- valores e/ou classes, nos casos em que são apresentadas alternativas no Eurocódigo;
- valores para serem utilizados nos casos em que apenas um símbolo é apresentado no Eurocódigo;
- dados específicos do país (geográficos, climáticos, etc.), por exemplo, mapa de zonamento da neve;
- o procedimento a utilizar nos casos em que sejam apresentados procedimentos alternativos no Eurocódigo.

Poderá ainda conter:

- decisões sobre a aplicação dos anexos informativos;
- informações complementares não contraditórias para auxílio do utilizador na aplicação do Eurocódigo.

Ligações entre os Eurocódigos e as especificações técnicas harmonizadas (EN e ETA) relativas aos produtos

É necessária uma consistência entre as especificações técnicas harmonizadas relativas aos produtos de construção e as regras técnicas relativas às obras⁴⁾. Além disso, todas as informações que acompanham a marcação CE dos produtos de construção que fazem referência aos Eurocódigos devem indicar, claramente, quais os Parâmetros Determinados a nível Nacional que foram tidos em conta.

Anexo Nacional da EN 1993-1-9

Esta Norma estabelece procedimentos alternativos e valores, recomenda classes e inclui notas indicando onde poderão ter de ser feitas opções nacionais. Por este motivo, a Norma Nacional de implementação da EN 1993-1-9 deverá ter um Anexo Nacional que contenha todos os Parâmetros Determinados a nível Nacional para o projecto de estruturas de aço a serem construídas no país a que diz respeito.

A opção nacional é permitida na EN 1993-1-9 em:

- 1.1(2)
- 2(2)
- 2(4)
- 3(2)
- 3(7)
- 5(2)
- 6.1(1)
- 6.2(2)
- 7.1(3)
- 7.1(5)
- 8(4)

⁴⁾ Ver n.º 3 do artigo 3º e artigo 12º da DPC, e também 4.2, 4.3.1, 4.3.2 e 5.2 do Documento Interpretativo n.º 1.

1 Generalidades

1.1 Objectivo e campo de aplicação

(1) A presente Norma estabelece métodos para a avaliação da resistência à fadiga de elementos, ligações e juntas sujeitos a um carregamento de fadiga.

(2) Estes métodos baseiam-se em ensaios de resistência à fadiga sobre provetes em grande escala, reproduzindo os efeitos das imperfeições geométricas e estruturais resultantes da produção dos materiais e da execução (por exemplo, os efeitos das tolerâncias de fabrico e das tensões residuais devidas à soldadura).

NOTA 1: Para as tolerâncias, ver a EN 1090. A escolha da norma de execução poderá ser feita no Anexo Nacional, até à data de publicação da EN 1090*).

NOTA 2: O Anexo Nacional poderá fornecer informações adicionais sobre os requisitos de inspecção durante o fabrico.

(3) As regras são aplicáveis às estruturas cuja execução é conforme com a EN 1090.

NOTA: Quando apropriado, são indicados requisitos adicionais nos quadros de classificação dos pormenores.

(4) Os métodos de avaliação indicados nesta Norma aplicam-se a todas as classes de aços de construção, aos aços inoxidáveis e aos aços não protegidos de resistência melhorada às condições atmosféricas, salvo indicação em contrário nos quadros de classificação de pormenores. Esta Norma aplica-se apenas aos materiais que cumprem os requisitos de tenacidade da EN 1993-1-10.

(5) Esta Norma não abrange outros métodos de avaliação da fadiga que não sejam os métodos $\Delta\sigma_R$ -N, tais como o método da extensão no fundo de entalhe ou os métodos da mecânica da fractura.

(6) Esta Norma não abrange os tratamentos após o fabrico destinados a melhorar a resistência à fadiga, excepto a relaxação de tensões.

(7) As resistências à fadiga indicadas nesta Norma aplicam-se a estruturas em condições atmosféricas normais, suficientemente protegidas contra a corrosão e com uma manutenção regular. Não está incluído o efeito da corrosão pela água do mar. Não estão incluídos os danos da microestrutura a temperaturas elevadas ($> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$).

1.2 Referências normativas

A presente Norma inclui, por referência, datada ou não, disposições relativas a outras normas. Estas referências normativas são citadas nos lugares apropriados do texto e as normas são listadas a seguir. Para referências datadas, as emendas ou revisões subsequentes de qualquer destas normas só se aplicam à presente Norma se nela incorporadas por emenda ou revisão. Para as referências não datadas, aplica-se a última edição da norma referida (incluindo as emendas).

Na presente Norma faz-se referência às seguintes normas gerais:

EN 1090 *Execution of steel structures – Technical requirements*

EN 1990^{*)} *Basis of structural design*

EN 1991^{**)} *Actions on structures*

EN 1993^{**)} *Design of steel structures*

EN 1994-2 *Design of composite steel and concrete structures – Part 2: Bridges*

^{*)} À data de publicação da presente Norma, as três Partes da EN 1090 já tinham sido publicadas (nota nacional).

^{**)} No Anexo Nacional NA são indicadas as normas portuguesas equivalentes (nota nacional).

1.3 Termos e definições

(1) Para os fins da presente Norma, utilizam-se os seguintes termos e definições.

1.3.1 Generalidades

1.3.1.1 fadiga

Processo de iniciação e de propagação de fendas num elemento estrutural provocado por flutuações de tensão.

1.3.1.2 tensão nominal

Tensão no material base ou numa soldadura adjacente à localização potencial de uma fenda, calculada pela teoria elástica excluindo qualquer efeito de concentração de tensões.

NOTA: A tensão nominal como definida na presente Norma pode ser uma tensão normal, uma tensão de corte, uma tensão principal ou uma tensão equivalente.

1.3.1.3 tensão nominal modificada

Tensão nominal majorada por um factor apropriado de concentração das tensões k_f , que permite ter em conta uma descontinuidade geométrica que não tenha sido considerada na classificação de determinado pormenor construtivo.

1.3.1.4 tensão geométrica

tensão na zona termicamente afectada

Tensão principal máxima no material base adjacente à concordância do cordão de soldadura, tendo em conta os efeitos da concentração de tensões devidos à geometria global de determinado pormenor construtivo.

NOTA: Não é necessário considerar os efeitos da concentração local de tensões, resultantes por exemplo do cordão de soldadura (que já estão incluídos nas categorias de pormenores do Anexo B).

1.3.1.5 tensão residual

A tensão residual designa um estado de tensão permanente, autoequilibrado e independente de qualquer acção aplicada. As tensões residuais podem resultar da laminagem, dos processos de corte, da retracção da soldadura, de defeitos de ajuste entre peças ou de qualquer caso de carga que provoque uma plastificação parcial da estrutura.

1.3.2 Parâmetros do carregamento de fadiga

1.3.2.1 caso de carregamento

Uma determinada sequência de carregamentos aplicados à estrutura, que dá origem a um historial de tensões, que se repete em geral um determinado número de vezes durante a vida da estrutura.

1.3.2.2 historial de tensões

Registo ou cálculo da variação das tensões num determinado ponto da estrutura durante um caso de carregamento.

1.3.2.3 método da gota de água

Método de contagem de ciclos para a elaboração de um espectro de variação de tensões a partir de um dado historial de tensões.

1.3.2.4 método do reservatório

Método de contagem de ciclos para a elaboração de um espectro de variação de tensões a partir de um dado historial de tensões.

NOTA: Para o tratamento matemático, ver o Anexo A.

1.3.2.5 intervalo de tensões

Diferença algébrica entre os dois extremos de um determinado ciclo de tensões que faz parte de um historial de tensões.

1.3.2.6 espectro de variação das tensões

Histograma de todos os valores dos intervalos de tensões de diferentes amplitudes registados ou calculados para um determinado caso de carregamento.

1.3.2.7 espectro de cálculo

Conjunto de todos os espectros de variação de tensões a considerar na avaliação da fadiga durante o tempo de vida de uma estrutura.

1.3.2.8 valor de cálculo do tempo de vida

Tempo de referência durante o qual é requerida a segurança da estrutura, com uma probabilidade aceitável em relação ao risco de rotura por fadiga.

1.3.2.9 tempo de vida em relação à fadiga

Período de tempo previsto para a ocorrência da rotura por fadiga sob a acção do espectro de cálculo.

1.3.2.10 somatório de Miner

Cálculo linear do dano acumulado, baseado na regra de Palmgren-Miner.

1.3.2.11 intervalo de tensões equivalente de amplitude constante

Intervalo de tensões de amplitude constante que conduziria a um tempo de vida em relação à fadiga idêntico ao obtido através do espectro de cálculo, sendo a comparação baseada no somatório de Miner.

NOTA: Para o tratamento matemático, ver o Anexo A.

1.3.2.12 carregamento de fadiga

Conjunto de parâmetros de acção baseados em casos de carregamento representativos e identificados pelas posições das cargas, a sua intensidade, a sua frequência de ocorrência, a sua sequência e o seu faseamento relativo.

NOTA 1: Os valores das acções de fadiga indicados na EN 1991 são limites superiores baseados na análise das medições dos efeitos das acções de acordo com o Anexo A.

NOTA 2: Os parâmetros das acções indicados na EN 1991 são:

- Q_{\max} , n_{\max} , espectro normalizado; ou
- $Q_{E, n_{\max}}$ correspondente a n_{\max} ; ou
- $Q_{E, 2}$ correspondente a $n = 2 \times 10^6$ ciclos.

Salvo indicação em contrário, os efeitos dinâmicos estão incluídos nestes parâmetros.

1.3.2.13 carregamento de fadiga equivalente de amplitude constante

Carregamento simplificado de amplitude constante provocando o mesmo dano por fadiga do que os resultantes dos casos de carregamento reais de amplitude variável.

1.3.3 Resistência à fadiga

1.3.3.1 curva de resistência à fadiga

Relação quantitativa entre o intervalo de tensões e o número de ciclos de tensão até à rotura por fadiga, utilizada na avaliação da resistência à fadiga de uma categoria de pormenor construtivo.

NOTA: Os valores da resistência à fadiga indicados na presente Norma são limites inferiores baseados na análise de resultados de ensaios de resistência à fadiga sobre provetes em grande escala em conformidade com o Anexo D da EN 1990.

1.3.3.2 categoria de pormenor

Designação numérica dada a um determinado pormenor para uma dada direcção de flutuação de tensões, a fim de indicar a curva de resistência à fadiga a aplicar na avaliação da resistência à fadiga (o número da categoria dos pormenores indica a resistência à fadiga de referência $\Delta\sigma_C$ em N/mm²).

1.3.3.3 limite de fadiga sob amplitude constante

Valor limite do intervalo de tensões normais ou de corte abaixo do qual não ocorrerá dano em ensaios em condições de amplitude constante. Em condições de amplitude variável, todos os intervalos de tensões têm que estar abaixo deste limite para que não haja dano por fadiga.

1.3.3.4 limite de truncatura

Limite abaixo do qual os intervalos de tensões do espectro de cálculo não contribuem para o dano acumulado calculado.

1.3.3.5 duração à fadiga

Tempo de vida até à rotura expresso em número de ciclos, sob a acção de um historial de tensões de amplitude constante.

1.3.3.6 resistência de referência à fadiga

Intervalo de tensões de amplitude constante $\Delta\sigma_C$, correspondente a uma duração à fadiga de $N = 2 \times 10^6$ ciclos para uma dada categoria de pormenores.

1.4 Símbolos

$\Delta\sigma$	intervalo de tensões (tensão normal)
$\Delta\tau$	intervalo de tensões (tensão de corte)
$\Delta\sigma_E, \Delta\tau_E$	intervalo de tensões, de amplitude constante equivalente, relativo a n_{max}
$\Delta\sigma_{E,2}, \Delta\tau_{E,2}$	intervalo de tensões, de amplitude constante equivalente, relativo a 2 milhões de ciclos
$\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$	valor de referência da resistência à fadiga a $N_C = 2$ milhões de ciclos
$\Delta\sigma_D, \Delta\tau_D$	limite de fadiga para intervalos de tensões de amplitude constante ao número de ciclos N_D
$\Delta\sigma_L, \Delta\tau_L$	limite de truncatura para intervalos de tensões ao número de ciclos N_L
$\Delta\sigma_{eq}$	intervalo de tensões equivalente para as ligações em almas de tabuleiros ortotrópicos
$\Delta\sigma_{C,red}$	valor de referência reduzido da resistência à fadiga
γ_{Ff}	coeficiente parcial para o intervalo de tensões de amplitude constante equivalente $\Delta\sigma_E, \Delta\tau_E$
γ_{Mf}	coeficiente parcial para a resistência à fadiga $\Delta\sigma_C, \Delta\tau_C$
m	inclinação da curva de resistência à fadiga
λ_i	factor de dano equivalente

ψ_1	coeficiente do valor frequente de uma acção variável
Q_k	valor característico de uma acção variável isolada
k_s	factor de redução da tensão de fadiga para ter em conta o efeito de escala
k_l	factor de majoração das tensões nominais para ter em conta os momentos flectores secundários nas vigas reticuladas
k_f	factor de concentração de tensões
N_R	valor de cálculo do tempo de vida expresso como um número de ciclos relativo a um intervalo de tensões constante

2 Requisitos básicos e métodos

(1)P Os elementos estruturais devem ser calculados em relação à fadiga de uma forma que o seu comportamento se mantenha satisfatório com um nível aceitável de probabilidade durante o valor de cálculo do tempo de vida útil.

NOTA: Admite-se que este requisito se encontra satisfeito nas estruturas calculadas para as acções de fadiga referidas na EN 1991 e para a resistência à fadiga de acordo com a presente Norma.

(2) O Anexo A poderá ser utilizado para a determinação de um modelo de carregamento de fadiga específico, se:

- não for indicado qualquer modelo de carregamento de fadiga na EN 1991;
- for requerido um modelo mais realista de carregamento de fadiga.

NOTA: No Anexo Nacional poderão ser especificados requisitos para a determinação de modelos de carregamento de fadiga específicos.

(3) Poderão ser realizados ensaios de resistência à fadiga:

- para a determinação da resistência à fadiga de pormenores não incluídos na presente Norma;
- para a determinação do tempo de vida em relação à fadiga de protótipos, para carregamentos reais ou de fadiga de dano equivalente.

(4) Na realização e na avaliação de ensaios de resistência à fadiga, deverá ser tida em conta a EN 1990 (ver também 7.1).

NOTA: No Anexo Nacional poderão ser especificados requisitos para a determinação da resistência à fadiga com base em ensaios.

(5) Os métodos de verificação em relação à fadiga indicados na presente Norma seguem o princípio da comparação dos efeitos das acções e das resistências à fadiga; uma tal comparação só é possível quando as acções de fadiga são determinadas com os parâmetros de resistência à fadiga que figuram na presente Norma.

(6) As acções de fadiga são determinadas de acordo com os requisitos da verificação em relação à fadiga. São diferentes das acções para a verificação em relação ao estado limite último e ao estado limite de utilização.

NOTA: A ocorrência de qualquer fenda por fadiga no decurso do período de utilização não significa, necessariamente, o fim desse período. As fendas deverão ser reparadas com especial cuidado de forma a evitar a introdução de condições de entalhe mais nocivas.

3 Métodos de verificação

(1) A verificação da fadiga deverá ser efectuada utilizando um dos seguintes métodos:

- método do dano controlado; ou

- método do tempo de vida garantido.

(2) O método do dano controlado deverá assegurar, com uma fiabilidade aceitável, que a estrutura terá um comportamento satisfatório durante o seu valor de cálculo do tempo de vida, na condição de ser implementado, durante esse período, um programa de inspecção e manutenção destinado a detectar e a corrigir o dano por fadiga.

NOTA 1: O método do dano controlado poderá ser aplicado quando, no caso de ocorrência de dano por fadiga, seja possível uma redistribuição de cargas entre os componentes dos elementos estruturais.

NOTA 2: O Anexo Nacional poderá estabelecer disposições para os programas de inspecção.

NOTA 3: Admite-se que toleram o dano as estruturas que são calculadas de acordo com o disposto na presente Norma, cujos materiais são escolhidos de acordo com a EN 1993-1-10 e que são objecto de uma manutenção regular.

(3) O método do tempo de vida garantido deverá assegurar, com uma fiabilidade aceitável, que a estrutura terá um comportamento satisfatório durante o valor de cálculo do seu tempo de vida útil sem a necessidade de inspecções regulares em funcionamento em relação ao dano por fadiga. O método do tempo de vida garantido deverá ser utilizado no caso em que a formação de uma fenda num componente pode conduzir rapidamente à rotura desse elemento ou da estrutura.

(4) Para a verificação da fadiga segundo a presente Norma, poderá obter-se um nível de fiabilidade aceitável ajustando o coeficiente parcial para a resistência à fadiga, γ_{Mf} , de modo a ter em conta as consequências da rotura e o método de verificação utilizado.

(5) As resistências à fadiga são determinadas considerando o pormenor construtivo com os seus efeitos de entalhe metalúrgicos e geométricos. Nos pormenores apresentados nesta Norma, é indicado o local provável de iniciação da formação de fendas.

(6) Os métodos de verificação apresentados nesta Norma recorrem a curvas de resistência à fadiga para:

- os pormenores normalizados, em termos de tensões nominais;
- as configurações de soldadura de referência, em termos de tensões geométricas.

(7) A fiabilidade requerida pode ser obtida do seguinte modo:

a) método do dano controlado

- escolha de pormenores, materiais e níveis de tensão de forma a que, no caso de formação de fendas, se verifique uma baixa velocidade de propagação de fendas e um elevado comprimento crítico de fendas;
- presença de caminhos alternativos de transmissão de cargas;
- presença de dispositivos de paragem de fendas;
- adopção de pormenores facilmente inspecionáveis nas inspecções periódicas;

b) método do tempo de vida garantido

- escolha de pormenores e de níveis de tensão que conduzam a um tempo de vida em relação à fadiga suficiente para obter valores de β superiores ou iguais aos relativos ao valor de cálculo do tempo de vida útil adoptado nas verificações em relação ao estado limite último.

NOTA: O Anexo Nacional poderá estabelecer o método de verificação e indicar a definição das classes de consequências e os valores numéricos de γ_{Mf} . No Quadro 3.1 são especificados os valores recomendados para γ_{Mf} .

Quadro 3.1 – Valores recomendados para o coeficiente parcial para a resistência à fadiga

Método de verificação	Consequências da rotura	
	Consequências pouco importantes	Consequências importantes
Dano controlado	1,00	1,15
Tempo de vida garantido	1,15	1,35

4 Tensões resultantes das acções de fadiga

(1) Os modelos para a avaliação das tensões nominais deverão ter em conta todos os efeitos das acções incluindo os efeitos da distorção, e deverão basear-se numa análise elástica linear dos elementos e das ligações.

(2) Para vigas reticuladas constituídas por secções tubulares, a modelação poderá basear-se num modelo simplificado de treliça com ligações articuladas. Desde que sejam tidas em conta as tensões devidas às acções aplicadas aos elementos entre as ligações, os efeitos dos momentos secundários resultantes da rigidez das ligações podem ser considerados através de factores k_1 (ver o Quadro 4.1 para as secções circulares e o Quadro 4.2 para as secções rectangulares; estas secções são sujeitas às restrições geométricas indicadas no Quadro 8.7).

Quadro 4.1 – Factores k_1 para secções tubulares circulares com carregamento no plano

Tipo de ligação		Cordas	Verticais	Diagonais
Ligação com afastamento	Tipo K	1,5	-	1,3
	Tipo N / Tipo KT	1,5	1,8	1,4
Ligação com sobreposição	Tipo K	1,5	-	1,2
	Tipo N / Tipo KT	1,5	1,65	1,25

Quadro 4.2 – Factores k_1 para secções tubulares rectangulares com carregamento no plano

Tipo de ligação		Cordas	Verticais	Diagonais
Ligação com afastamento	Tipo K	1,5	-	1,5
	Tipo N / Tipo KT	1,5	2,2	1,6
Ligação com sobreposição	Tipo K	1,5	-	1,3
	Tipo N / Tipo KT	1,5	2,0	1,4

NOTA 1: Para a definição dos tipos de ligação, ver a EN 1993-1-8.

NOTA 2: Domínios de validade das grandezas geométricas:

Para juntas planas CHS (juntas de tipo K, N, KT):

$$0,30 \leq \beta \leq 0,60;$$

$$12,0 \leq \gamma \leq 30,0;$$

$$0,25 \leq \tau \leq 1,00;$$

$$30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ.$$

Para juntas SHS (juntas de tipo K, N, KT):

$$0,40 \leq \beta \leq 0,60;$$

$$6,25 \leq \gamma \leq 12,5;$$

$$0,25 \leq \tau \leq 1,00;$$

$$30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ.$$

5 Cálculo das tensões

(1) As tensões deverão ser calculadas no estado limite de utilização.

(2) As secções transversais da Classe 4 são verificadas em relação às cargas de fadiga de acordo com a EN 1993-1-5.

NOTA 1: Para recomendações, ver as EN 1993-2 a EN 1993-6.

NOTA 2: O Anexo Nacional poderá estabelecer limitações para as secções da Classe 4.

(3) As tensões nominais deverão ser calculadas no local potencial de iniciação da fenda. Os efeitos que produzem concentrações de tensões em pormenores que não estejam considerados nos Quadros 8.1 a 8.10 deverão ser tidos em conta calculando uma tensão nominal modificada através de um factor de concentração de tensões (SCF) de acordo com 6.3.

(4) Quando se utilizam métodos baseados em tensões geométricas (na zona termicamente afectada) para os pormenores incluídos no Quadro B.1, as tensões deverão ser calculadas como indicado em 6.5.

(5) As tensões relevantes no material de base de pormenores são:

- tensões nominais normais σ ;
- tensões nominais de corte τ .

NOTA: Para os efeitos de tensões nominais combinadas, ver 8(3).

(6) As tensões relevantes nas soldaduras são (ver a Figura 5.1):

- tensões normais σ_{wf} perpendiculares ao eixo do cordão da soldadura: $\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{\perp f}^2 + \tau_{\perp f}^2}$
- tensões de corte τ_{wf} paralelas ao eixo do cordão da soldadura: $\tau_{wf} = \tau_{\parallel f}$

para as quais deverão ser efectuadas duas verificações separadas.

NOTA: O procedimento acima referido difere do procedimento referido na EN 1993-1-8 para a verificação em relação ao estado limite último das soldaduras de ângulo.

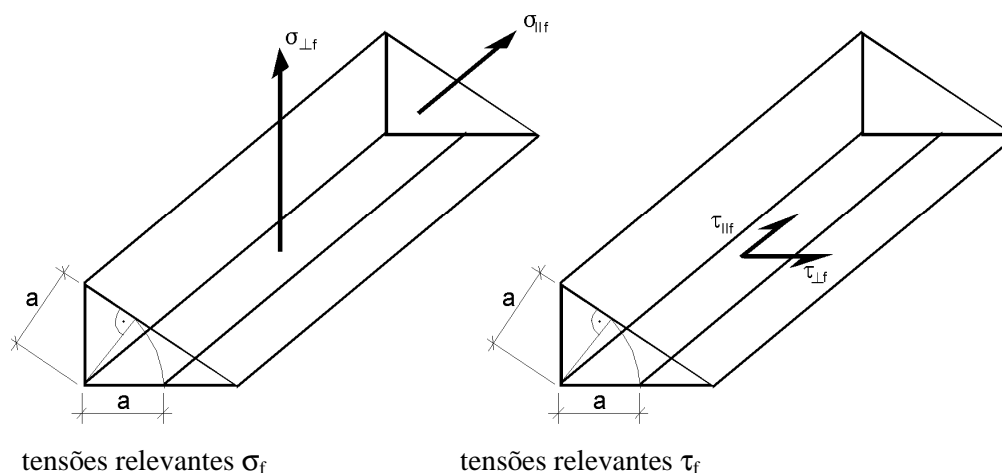


Figura 5.1 – Tensões relevantes nas soldaduras de ângulo

6 Cálculo dos intervalos de tensão

6.1 Generalidades

(1) As verificações em relação à fadiga deverão ser efectuadas utilizando:

- as amplitudes de tensão nominal para os pormenores indicados nos Quadros 8.1 a 8.10;
- as amplitudes de tensão nominal modificada quando, por exemplo, ocorre uma variação brusca de secção não incluída nos Quadros 8.1 a 8.10 próxima da iniciação da fenda; ou
- as amplitudes de tensão geométrica no caso de um gradiente importante de tensões próximo de uma concordância de um cordão de soldadura nas ligações incluídas no Quadro B.1.

NOTA: O Anexo Nacional poderá fornecer informações sobre a utilização das amplitudes de tensão nominal, de tensão nominal modificada ou de tensão geométrica. Para as categorias dos pormenores construtivos com amplitudes de tensão geométrica, ver o Anexo B.

(2) O valor de cálculo do intervalo de tensões a utilizar na verificação em relação à fadiga deverá ser $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}$ correspondente a $N_C = 2 \times 10^6$ ciclos.

6.2 Valor de cálculo da amplitude de tensão nominal

(1) O valor de cálculo das amplitudes de tensão nominal $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}$ e $\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}$ deverá ser determinado do seguinte modo:

$$\begin{aligned}\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} &= \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_i \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\sigma(\gamma_{Ff} Q_k) \\ \gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2} &= \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_i \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\tau(\gamma_{Ff} Q_k)\end{aligned}\tag{6.1}$$

em que:

$\Delta\sigma(\gamma_{Ff} Q_k)$, $\Delta\tau(\gamma_{Ff} Q_k)$ intervalo de tensões resultantes do carregamento de fadiga especificado na EN 1991;

λ_i factores de dano equivalente em função dos espectros como especificados nas Partes apropriadas da EN 1993.

(2) Na falta de dados adequados para λ_i , o valor de cálculo da amplitude de tensão nominal poderá ser determinado utilizando os princípios estabelecidos no Anexo A.

NOTA: O Anexo Nacional poderá fornecer informações suplementares ao Anexo A.

6.3 Valor de cálculo da amplitude de tensão nominal modificada

(1) O valor de cálculo das amplitudes de tensão nominal modificada $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}$ e $\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}$ deverá ser determinado do seguinte modo:

$$\begin{aligned}\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} &= k_f \times \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_i \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\sigma(\gamma_{Ff} Q_k) \\ \gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2} &= k_f \times \lambda_1 \times \lambda_2 \times \lambda_i \times \dots \times \lambda_n \times \Delta\tau(\gamma_{Ff} Q_k)\end{aligned}\tag{6.2}$$

em que:

k_f factor de concentração de tensões que traduz uma amplificação local das tensões, relacionada com a geometria dos pormenores, não incluída na curva $\Delta\sigma_R$ -N de referência.

NOTA: Os valores de k_f poderão ser obtidos de manuais ou através de cálculos adequados pelo método dos elementos finitos.

6.4 Valor de cálculo do intervalo de tensões para ligações soldadas de secções tubulares

(1) Na falta de cálculos mais precisos, o valor de cálculo da amplitude de tensão nominal modificada, $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}$, deverá ser determinado do modo seguinte, utilizando o modelo simplificado de 4(2):

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2} = k_1 \left(\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}^* \right) \quad (6.3)$$

em que:

$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}^*$ valor de cálculo do intervalo de tensões calculado com um modelo simplificado de treliça com ligações articuladas;

k_1 factor de majoração indicado nos Quadros 4.1 e 4.2.

6.5 Valor de cálculo do intervalo de tensões para a tensão geométrica (na zona termicamente afectada)

(1) O valor de cálculo da amplitude de tensão geométrica (na zona termicamente afectada), $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}$, deverá ser determinado do seguinte modo:

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2} = k_f \left(\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}^* \right) \quad (6.4)$$

em que:

k_f factor de concentração de tensões.

7 Resistência à fadiga

7.1 Generalidades

(1) A resistência à fadiga para as amplitudes de tensão nominal é representada por uma série de curvas $(\log \Delta\sigma_R) - (\log N)$ e curvas $(\log \Delta\tau_R) - (\log N)$ (curvas S-N), correspondentes a categorias de pormenores típicos. Cada categoria de pormenores é designada por um número que representa, em N/mm², o valor de referência $\Delta\sigma_C$ e $\Delta\tau_C$ da resistência à fadiga para 2 milhões de ciclos.

(2) Para os domínios de tensões nominais de amplitude constante, as resistências à fadiga podem ser obtidas do seguinte modo:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m 2 \times 10^6 \quad \text{com } m = 3 \text{ para } N \leq 5 \times 10^6, \text{ ver a Figura 7.1;}$$

$$\Delta\tau_R^m N_R = \Delta\tau_C^m 2 \times 10^6 \quad \text{com } m = 5 \text{ para } N \leq 10^8, \text{ ver a Figura 7.2;}$$

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5} \right)^{1/3} \Delta\sigma_C = 0,737 \Delta\sigma_C \quad \text{é o limite de fadiga a amplitude constante, ver a Figura 7.1;}$$

$$\Delta\tau_L = \left(\frac{2}{100} \right)^{1/5} \Delta\tau_C = 0,457 \Delta\tau_C \quad \text{é o limite de truncatura, ver a Figura 7.2.}$$

(3) Para um espectro de tensões nominais com intervalos de tensões acima e abaixo do limite de fadiga a amplitude constante, $\Delta\sigma_D$, a resistência à fadiga deverá ser avaliada através de curvas generalizadas de resistência à fadiga, do seguinte modo:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m 2 \times 10^6 \quad \text{com } m = 3 \text{ para } N \leq 5 \times 10^6;$$

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D^m 5 \times 10^6 \quad \text{com } m = 5 \text{ para } 5 \times 10^6 \leq N \leq 10^8;$$

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} \Delta\sigma_D = 0,549\Delta\sigma_D \quad \text{é o limite de truncatura, ver a Figura 7.1.}$$

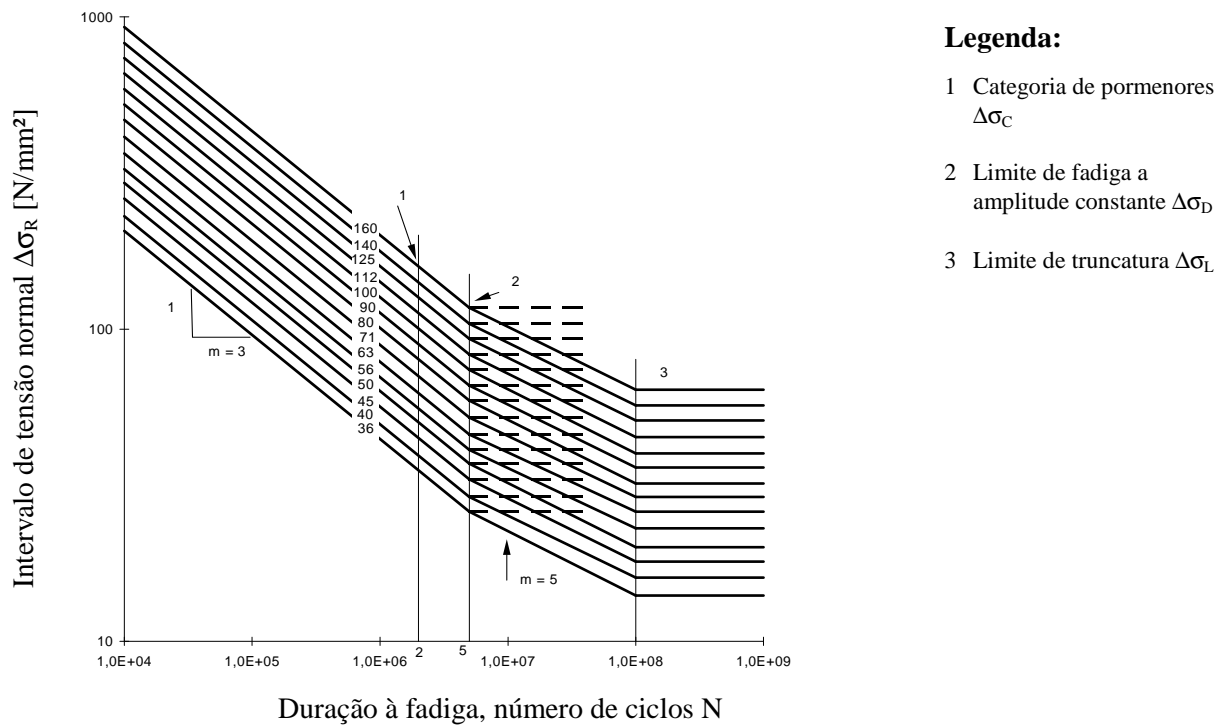
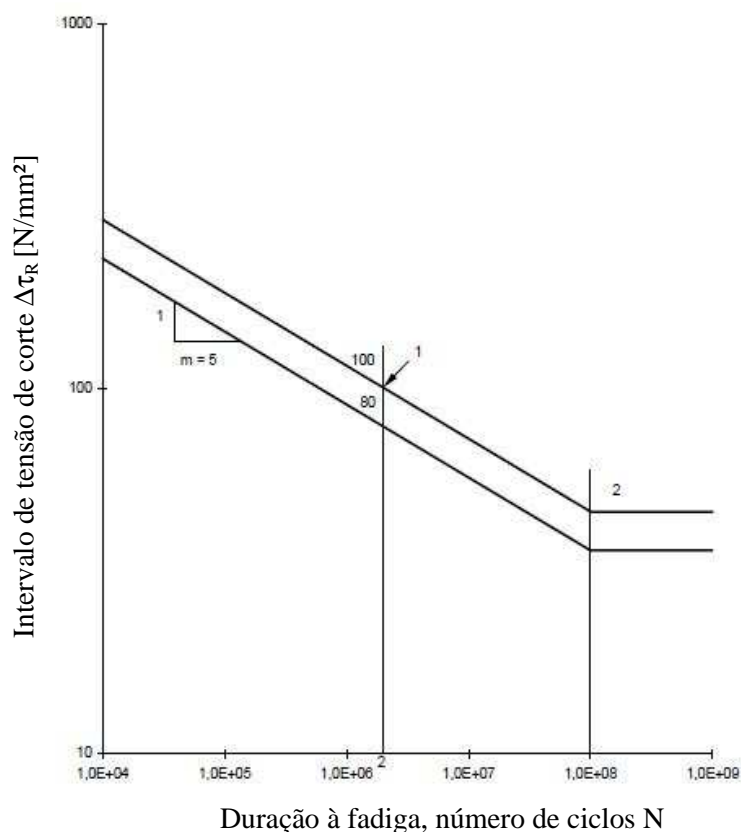


Figura 7.1 – Curvas de resistência à fadiga para intervalos de tensões normais



Legenda:

- 1 Categoria de pormenores $\Delta\tau_C$
- 2 Limite de truncatura $\Delta\tau_L$

Figura 7.2 – Curvas de resistência à fadiga para intervalos de tensões de corte

NOTA 1: Quando foram utilizados dados de ensaios para estabelecer a categoria apropriada de um determinado pormenor construtivo, o valor do intervalo de tensões $\Delta\sigma_C$ correspondente a um valor de $N_C = 2$ milhões de ciclos foi calculado para um nível de confiança de 75 % com uma probabilidade de 95 % de $\log N$ ser ultrapassado, tendo em consideração o desvio padrão, o tamanho da amostra e os efeitos das tensões residuais. O número de ensaios (não inferior a 10) foi tido em conta na análise estatística, ver o Anexo D da EN 1990.

NOTA 2: O Anexo Nacional poderá autorizar a verificação de uma categoria de resistência à fadiga para uma determinada aplicação, desde que efectuada de acordo com a NOTA 1.

NOTA 3: Para determinados pormenores, os resultados experimentais podem não corresponder exactamente às curvas de resistência à fadiga da Figura 7.1. Para assegurar que são evitadas quaisquer situações contra a segurança, esses pormenores, assinalados com um asterisco, são classificados numa categoria inferior à que a sua resistência à fadiga a 2×10^6 ciclos permitiria. Em alternativa, poderá aumentar-se na verificação a classificação desses pormenores de uma categoria, desde que o limite de fadiga a amplitude constante, $\Delta\sigma_D$, seja definido como a resistência à fadiga a 10^7 ciclos para $m=3$ (ver a Figura 7.3).

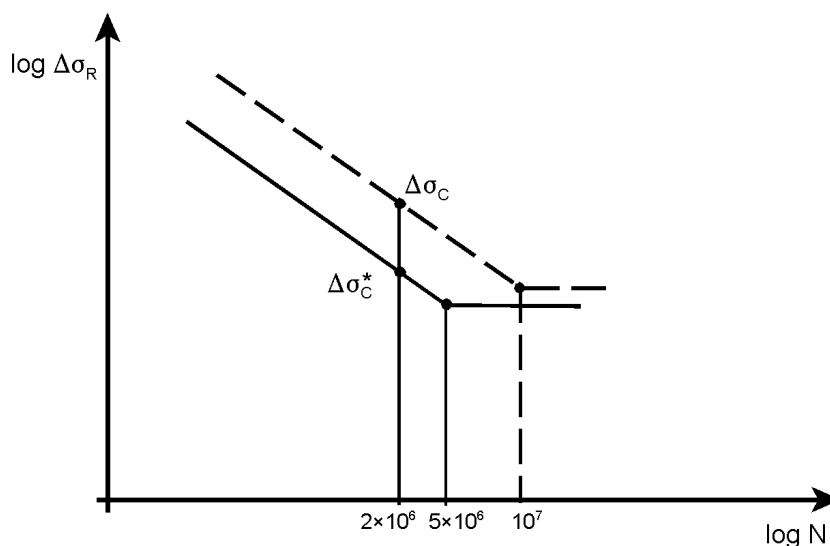


Figura 7.3 – Resistência alternativa $\Delta\sigma_C$ para os pormenores classificados como $\Delta\sigma_C^*$

(4) As categorias de pormenores $\Delta\sigma_C$ e $\Delta\tau_C$ para as tensões nominais são indicadas em:

Quadro 8.1 para elementos não soldados e uniões com ligações mecânicas;

Quadro 8.2 para secções compostas soldadas;

Quadro 8.3 para soldaduras transversais de topo;

Quadro 8.4 para acessórios e reforços soldados;

Quadro 8.5 para ligações soldadas de transmissão de esforços;

Quadro 8.6 para secções tubulares;

Quadro 8.7 para nós de vigas reticuladas;

Quadro 8.8 para tabuleiros ortotrópicos – reforços de secção fechada;

Quadro 8.9 para tabuleiros ortotrópicos – reforços de secção aberta;

Quadro 8.10 para ligações do banzo superior à alma de vigas de caminhos de rolamento.

(5) As categorias de resistência à fadiga $\Delta\sigma_C$ para as amplitudes de tensão geométrica são indicadas no Anexo B.

NOTA: O Anexo Nacional poderá indicar categorias de resistência à fadiga $\Delta\sigma_C$ e $\Delta\tau_C$ para os pormenores não incluídos nos Quadros 8.1 a 8.10 e no Anexo B.

7.2 Modificações da resistência à fadiga

7.2.1 Pormenores não soldados ou soldados com relaxação de tensões em compressão

(1) Nos pormenores não soldados ou soldados com relaxação de tensões, a influência da tensão média na resistência à fadiga poderá ser tida em conta pela determinação de um intervalo eficaz reduzido de tensões, $\Delta\sigma_{E,2}$, na verificação em relação à fadiga, quando parte ou todo o ciclo de tensões está em compressão.

(2) O intervalo de tensões eficaz poderá ser calculado adicionando a parte em tracção e 60 % da parte em compressão do intervalo de tensões, ver a Figura 7.4.

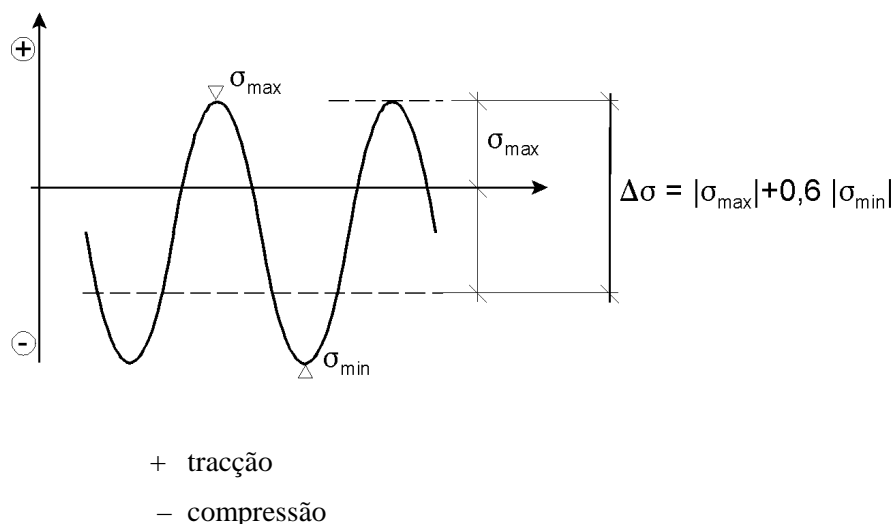


Figura 7.4 – Modificação do intervalo de tensões para pormenores não soldados ou com relaxação de tensões

7.2.2 Efeito de escala

(1) O efeito de escala devido à espessura ou a outras dimensões deverá ser tido em conta como indicado nos Quadros 8.1 a 8.10. A resistência à fadiga é, então, obtida por:

$$\Delta\sigma_{C,red} = k_s \Delta\sigma_C \quad (7.1)$$

8 Verificação em relação à fadiga

(1) Os intervalos de tensões nominal, nominal modificada ou geométrica devidos às cargas frequentes, $\psi_1 Q_k$ (ver a EN 1990), não deverão exceder:

$\Delta\sigma \leq 1,5f_y$ para os intervalos de tensões normais;

$\Delta\tau \leq 1,5f_y / \sqrt{3}$ para os intervalos de tensões de corte.

(2) Deverá verificar-se que, sob o carregamento de fadiga:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (8.1)$$

e

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (8.2)$$

NOTA: Os Quadros 8.1 a 8.9 requerem que, para certos pormenores, os intervalos de tensões se baseiem nas tensões principais.

(3) Salvo indicação em contrário, para as categorias de pormenores dos Quadros 8.8 e 8.9 deverá verificar-se, no caso de intervalos de tensões combinadas, $\Delta\sigma_{E,2}$ e $\Delta\tau_{E,2}$, que:

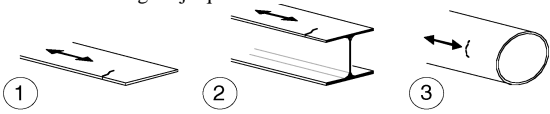


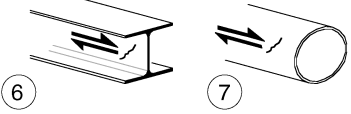
$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1,0 \quad (8.3)$$

(4) Quando $\Delta\sigma_{E,2}$ ou $\Delta\tau_{E,2}$ não são conhecidos, a verificação poderá ser efectuada com o formato do Anexo A.

NOTA 1: O Anexo A apresenta intervalos de tensões normais. Estes valores poderão também ser adoptados para os intervalos de tensões de corte.

NOTA 2: O Anexo Nacional poderá fornecer informações sobre a utilização do Anexo A.

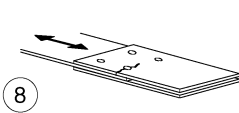
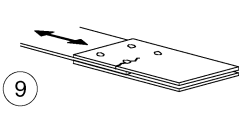
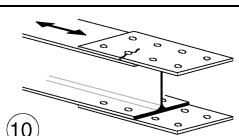
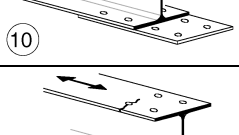
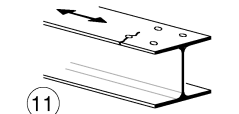
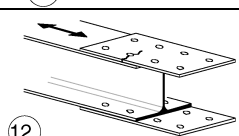
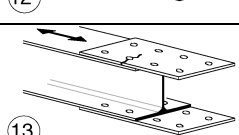
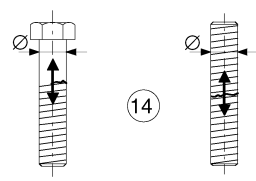
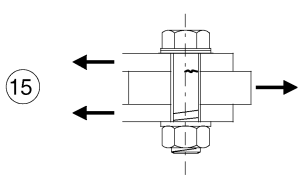
Quadro 8.1 – Elementos não soldados e uniões com ligações mecânicas

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
160	<p>NOTA: A curva de resistência à fadiga associada à categoria 160 é a mais elevada. Nenhum pormenor pode atingir uma melhor resistência à fadiga seja qual for o número de ciclos.</p> 	<p><u>Produtos laminados ou extrudidos:</u></p> <p>1) Chapas e barras com bordos laminados. 2) Perfis laminados com bordos laminados. 3) Secções tubulares sem costura, rectangulares ou circulares.</p>	<p><u>Pormenores 1) a 3):</u></p> <p>Arestas vivas, imperfeições superficiais e de laminagem melhoradas por rectificação até à sua eliminação e obtenção de uma transição suave.</p>
140		<p><u>Chapas cortadas mecanicamente ou por processo autogéneo:</u></p> <p>4) Corte autogéneo ou mecânico com rectificação posterior.</p>	<p>4) Eliminação de todos os sinais visíveis de defeitos nos bordos. Zonas de corte são maquinadas ou rectificadas e todas as rebarbas eliminadas. Todas as estrias resultantes, por exemplo, de operações de rectificação, apenas podem ser paralelas às tensões.</p>
125		<p>5) Corte autogéneo automático, com linhas de fusão pouco profundas e regulares ou corte autogéneo manual, com posterior eliminação de qualquer defeito de bordo. Qualidade do corte autogéneo automático de acordo com a EN 1090.</p>	<p><u>Pormenores 4) e 5):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Os cantos reentrantes são melhorados por meio de rectificação (inclinação $\leq 1/4$) ou a verificação é feita utilizando os factores de concentração de tensões adequados. - Não existem reparações por reenchimento da soldadura.
100 m = 5		<p>6) e 7) Produtos laminados ou extrudidos como nos pormenores 1), 2), 3).</p>	<p><u>Pormenores 6) e 7):</u></p> <p>$\Delta\tau$ calculado a partir de:</p> $\tau = \frac{V S(t)}{I t}$

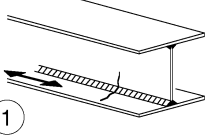
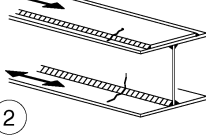
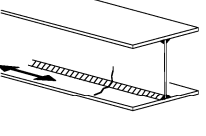
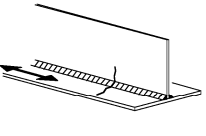
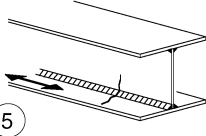
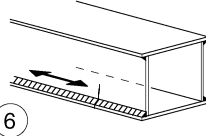
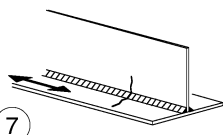
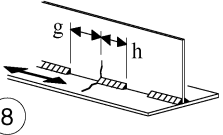
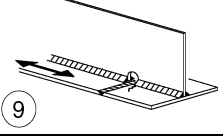
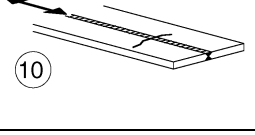
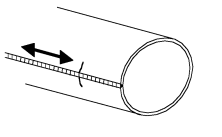
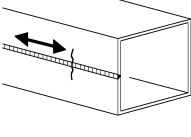
Para os pormenores 1 – 5 de aços resistentes às condições atmosféricas, utilizar a categoria imediatamente inferior.

(continua)

Quadro 8.1 – Elementos não soldados e uniões com ligações mecânicas (conclusão)

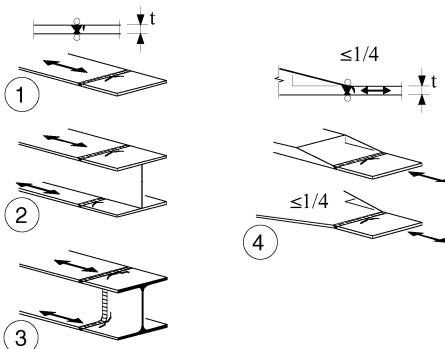
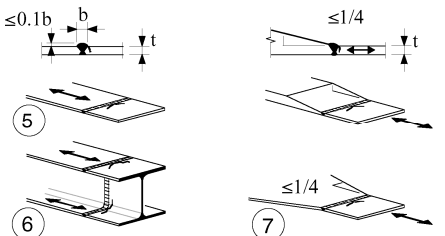
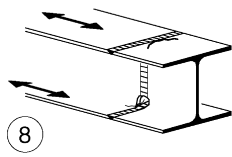
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Descrição	Requisitos	
112			8) Ligação com dupla sobreposição e parafusos de alta resistência pré-esforçados.	8) $\Delta\sigma$ a calcular sobre a secção bruta.	Para as ligações aparafusadas (Pormenores 8) a 13)) em geral: Distância ao topo: $e_1 \geq 1,5 d$ Distância ao bordo: $e_2 \geq 1,5 d$ Espaçamento: $p_1 \geq 2,5 d$ Espaçamento: $p_2 \geq 2,5 d$ Pormenorização de acordo com a EN 1993-1-8, Figura 3.1
			8) Ligação com dupla sobreposição e parafusos injectados pré-esforçados.	8) ... secção bruta.	
90			9) Ligação com dupla sobreposição e parafusos ajustados.	9) ... secção útil.	
			9) Ligação com dupla sobreposição e parafusos injectados não pré-esforçados.	9) ... secção útil.	
			10) Ligação de simples sobreposição e parafusos de alta resistência pré-esforçados.	10) ... secção bruta.	
			10) Ligação de simples sobreposição e parafusos injectados pré-esforçados.	10) ... secção bruta.	
80			11) Elemento estrutural com furação e solicitado à flexão e ao esforço normal.	11) ... secção útil.	
			12) Ligação de simples sobreposição e parafusos ajustados.	12) ... secção útil.	
50			12) Ligação de simples sobreposição e parafusos injectados não pré-esforçados.	12) ... secção útil.	
			13) Ligação de simples ou dupla sobreposição e parafusos não pré-esforçados em furação normal. Não existe inversão de esforços.	13) ... secção útil.	
50	efeito de dimensão para $t > 30 \text{ mm}$: $k_s = (30/t)^{0,25}$		14) Parafusos e varões traccionados com roscas laminadas ou executadas por corte. Para grandes diâmetros (cavilhas de fixação), o efeito de dimensão é tido em conta com k_s .	14) $\Delta\sigma$ calculado em relação à secção traccionada não roscada do parafuso. São tidas em conta a flexão e a tracção resultantes do efeito de alavanca e as tensões de flexão resultantes de outros efeitos. Para os parafusos pré-esforçados, poderá ser tida em conta a redução do intervalo de tensões.	
100 m=5			Parafusos solicitados ao corte simples ou duplo O plano de corte não passa pela parte roscada 15) - Parafusos ajustados. - Parafusos correntes sem inversão de esforços (parafusos das classes 5.6, 8.8 ou 10.9).	15) Δt calculado em relação à secção da espiga do parafuso.	

Quadro 8.2 – Secções compostas soldadas

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
125	 	<u>Soldaduras longitudinais contínuas:</u> 1) Soldadura automática ou totalmente mecânica de topo executada em ambos os lados. 2) Soldadura automática ou totalmente mecânica de ângulo. Extremidades das chapas de recobrimento a verificar de acordo com o pormenor 6) ou 7) do Quadro 8.5.	<u>Pormenores 1) e 2):</u> Não é permitida qualquer paragem/recomeço da soldadura excepto no caso em que a reparação é executada por um especialista e a execução correcta da reparação é controlada por inspecção.
112	 	3) Soldadura automática ou totalmente mecânica de ângulo ou de topo executada nos dois lados, mas com paragem/recomeço. 4) Soldadura automática ou totalmente mecânica de topo executada apenas num dos lados, com uma contrachapa contínua no lado oposto, sem paragem/recomeço.	4) No caso em que este pormenor apresentar traços de paragem/recomeço utiliza-se a categoria 100.
100	 	5) Soldadura manual de ângulo ou de topo. 6) Soldadura manual, automática ou totalmente mecânica de topo executada apenas num dos lados, em particular nas vigas em caixão.	5), 6) É essencial um muito bom ajustamento entre as chapas do banzo e da alma. O bordo da alma é preparado de forma a garantir na sua base uma penetração regular e sem interrupção da soldadura.
100		7) Reparação de uma soldadura manual, automática ou totalmente mecânica de ângulo ou de topo para as categorias 1) a 6).	7) Uma rectificação executada por um especialista para eliminação de todos os traços de defeitos e um controlo adequado podem restaurar a categoria original.
80	 $g/h \leq 2,5$	8) Soldadura de ângulo longitudinal descontinua.	8) $\Delta\sigma$ é baseado na tensão normal no banzo.
71		9) Soldadura de topo longitudinal, soldadura de ângulo ou soldadura descontinua com entalhe na intersecção de altura não superior a 60 mm. Para um entalhe na intersecção de altura > 60 mm, ver o pormenor 1) no Quadro 8.4.	9) $\Delta\sigma$ é baseado na tensão normal no banzo.
125		10) Soldadura de topo longitudinal, aplanada de ambos os lados por máquina paralelamente à direcção do esforço, controlo 100 % NDT.	
112		10) Sem rectificação nem paragem/recomeço.	
90		10) Com posições de paragem/recomeço.	
140	 	11) Soldadura longitudinal automática ou totalmente mecânica em secções tubulares sem paragem/recomeço.	11) Espessura da parede $t \leq 12,5$ mm.
125		11) Soldadura longitudinal automática ou totalmente mecânica em secções tubulares sem paragem/recomeço.	11) Espessura da parede $t > 12,5$ mm.
90		11) Com paragem/recomeço da soldadura.	

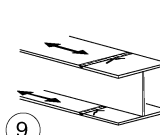
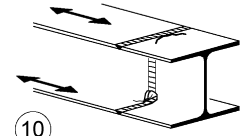
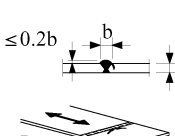
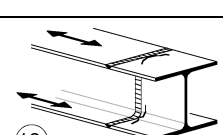
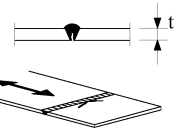
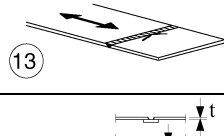

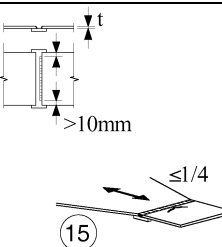
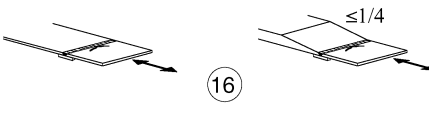
Para os pormenores 1 a 11 executados com soldadura totalmente mecânica, aplicam-se as categorias da soldadura automática.

Quadro 8.3 – Soldaduras transversais de topo

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
112		<p><u>Sem contrachapa de apoio:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Emendas transversais de chapas e barras. 2) Emendas de banzo e de alma de vigas compostas antes da sua construção. 3) Emendas com soldaduras de topo da secção total de perfis laminados sem entalhes nas intersecções. 4) Emendas transversais de chapas ou barras de largura ou espessura variáveis, com uma inclinação $\leq 1/4$. 	<ul style="list-style-type: none"> - Todas as soldaduras aplanadas por máquina até à face da superfície da chapa paralelamente à direcção da seta. - Postiços de extremidade retirados após a soldadura. Bordos das chapas aplanados por máquina na direcção das tensões. - Soldadura nos dois lados; controlada por NDT. <p><u>Pormenor 3):</u> Apenas para secções laminadas, cortadas e soldadas.</p>
90		<ol style="list-style-type: none"> 5) Emendas transversais de chapas ou barras. 6) Emendas com soldaduras de topo da secção total de perfis laminados sem entalhes nas intersecções. 7) Emendas transversais de chapas ou barras de largura ou espessura variáveis, com uma inclinação $\leq 1/4$. Transição das soldaduras maquinadas para eliminação dos entalhes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Altura da convexidade do cordão não superior a 10 % da largura do cordão, com transições suaves para a superfície da chapa. - Postiços de extremidade retirados após a soldadura. Bordos das chapas aplanados por máquina na direcção das tensões. - Soldadura nos dois lados; controlada por NDT. <p><u>Pormenores 5) e 7):</u> Soldaduras executadas na horizontal.</p>
90		<ol style="list-style-type: none"> 8) Como no pormenor 3) mas com entalhes na intersecção. 	<ul style="list-style-type: none"> - Todas as soldaduras aplanadas por máquina até à face da superfície da chapa paralelamente à direcção da seta. - Postiços de extremidade retirados após a soldadura. Bordos das chapas aplanados por máquina na direcção das tensões. - Soldadura nos dois lados; controlada por NDT. - Secções laminadas com as mesmas dimensões sem diferenças de tolerância.

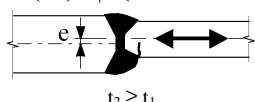
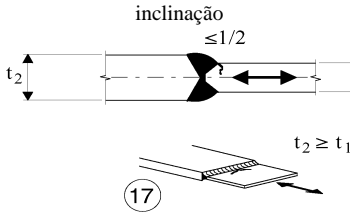
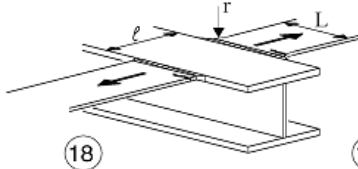

(continua)

Quadro 8.3 – Soldaduras transversais de topo (continuação)

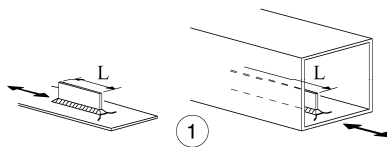
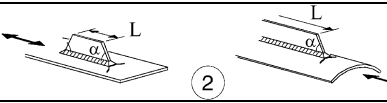
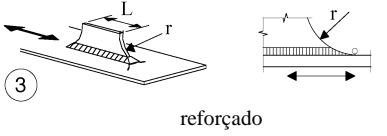
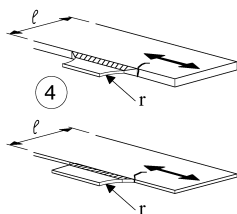
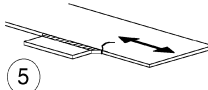
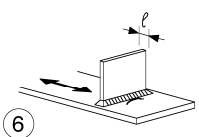
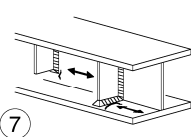
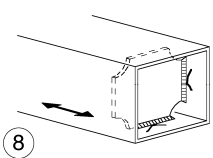
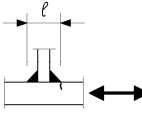
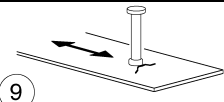
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Descrição	Requisitos
80	efeito de dimensão para $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$	  	<p>9) Emendas transversais de vigas compostas soldadas sem entalhes nas intersecções.</p> <p>10) Soldaduras de topo da secção total de perfis laminados com entalhes nas intersecções.</p> <p>11) Emendas transversais de chapas, barras, secções laminadas ou vigas compostas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Altura da convexidade do cordão não superior a 20 % da largura do cordão, com transições suaves para a superfície da chapa. - Soldadura não aplanada por máquina. - Postiços de extremidade retirados após a soldadura. Bordos das chapas aplanados por máquina na direcção das tensões. - Soldadura nos dois lados; controlada por NDT. <p><u>Pormenor 10):</u> Altura da convexidade do cordão não superior a 10 % da largura do cordão, com transições suaves para a superfície da chapa.</p>
63			<p>12) Emendas com soldaduras de topo da secção total de perfis laminados sem entalhes nas intersecções.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Postiços de extremidade retirados após a soldadura. Bordos das chapas aplanados por máquina na direcção das tensões. - Soldada nos dois lados.
36			<p>13) Soldaduras de topo executadas de um só lado.</p>	13) Sem contrachapas de apoio.
71	efeito de dimensão para $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$		<p>13) Soldaduras de topo executadas de um só lado unicamente quando a penetração total é verificada por meio de um controlo por NDT adequado.</p>	
71	efeito de dimensão para $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$	 	<p><u>Com contrachapas de apoio:</u></p> <p>14) Emenda transversal.</p> <p>15) Soldadura de topo transversal com largura ou espessura variável com uma inclinação $\leq 1/4$. Também válido para chapas curvas.</p>	<p><u>Pormenores 14) e 15):</u></p> <p>As soldaduras de ângulo que fixam a contrachapa de apoio terminam pelo menos a 10 mm dos bordos da chapa solicitada. Soldaduras de posição no interior da soldadura definitiva.</p>
50	efeito de dimensão para $t > 25$ mm: $k_s = (25/t)^{0.2}$		<p>16) Soldadura transversal de topo com contrachapa de apoio permanente, de largura ou espessura variável, com uma inclinação $\leq 1/4$. Também válido para chapas curvas.</p>	<p>16) As soldaduras de ângulo da contrachapa de apoio terminam a menos de 10 mm do bordo da chapa, ou não pode ser garantido um bom ajustamento.</p>

(continua)

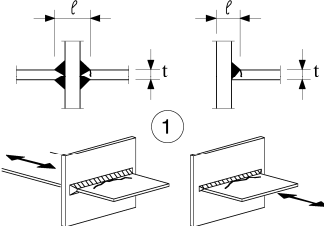
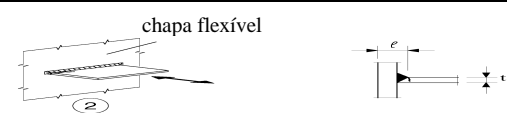
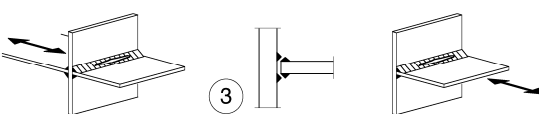
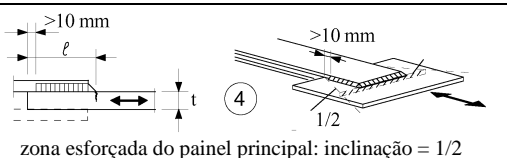
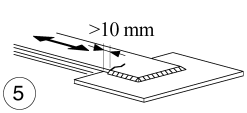
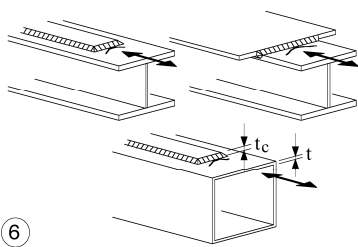
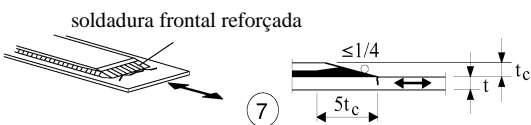
Quadro 8.3 – Soldaduras transversais de topo (conclusão)

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Descrição	Requisitos
71	efeito de dimensão para $t > 25 \text{ mm}$ e/ou efeito de excentricidade: $k_s = \left(\frac{25}{t_1} \right)^{0,2} \left/ \left(1 + \frac{6e}{t_1} \frac{t_1^{1,5}}{t_1^{1,5} + t_2^{1,5}} \right) \right.$ 		17) Soldadura transversal de topo, espessuras diferentes sem transição, folhetos médios alinhados.	
40			18) Soldadura transversal de topo no cruzamento de banzos.	<u>Pormenores 18) e 19)</u> A resistência à fadiga do componente contínuo tem de ser verificada com o Quadro 8.4, pormenor 4) ou pormenor 5).
Como o pormenor 4) do Quadro 8.4			19) Com raio de concordância de acordo com o pormenor 4) do Quadro 8.4.	

Quadro 8.4 – Acessórios e reforços soldados

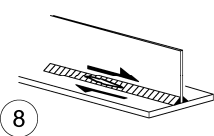
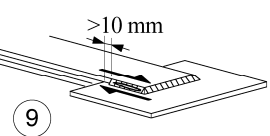
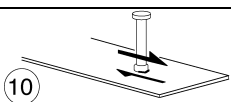
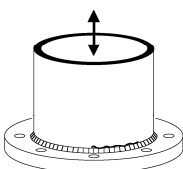
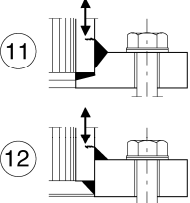
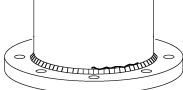
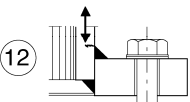
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Descrição	Requisitos
80	$L \leq 50 \text{ mm}$	 <p>1</p>	<u>Acessórios longitudinais:</u> 1) A categoria dos pormenores varia com o comprimento do acessório, L.	Espessura do acessório inferior à sua altura. Caso contrário, ver o Quadro 8.5, pormenores 5) ou 6).
71	$50 < L \leq 80 \text{ mm}$			
63	$80 < L \leq 100 \text{ mm}$			
56	$L > 100 \text{ mm}$			
71	$L > 100 \text{ mm}$ $\alpha < 45^\circ$	 <p>2</p>	2) Acessório longitudinal sobre uma chapa ou um tubo.	
80	$r > 150 \text{ mm}$	 <p>3</p> <p>reforçado</p>	3) "Gousset" com raio de transição por soldadura de ângulo longitudinal à chapa ou ao tubo; extremidade do cordão de ângulo reforçada (penetração total); comprimento do cordão reforçado $> r$.	<u>Pormenores 3) e 4):</u> Raio de transição suave, r, executado por maquinagem ou corte autogéneo do "gousset" antes da sua soldadura, e posterior rectificação da soldadura paralelamente à direcção da seta de forma a eliminar completamente a extremidade do cordão transversal de soldadura.
90	$\frac{r}{\ell} \geq \frac{1}{3}$ ou $r > 150 \text{ mm}$	 <p>4</p>	4) "Gousset" soldado ao bordo de uma chapa ou do banzo de uma viga.	
71	$\frac{1}{6} \leq \frac{r}{\ell} \leq \frac{1}{3}$			
50	$\frac{r}{\ell} < \frac{1}{6}$			
40		 <p>5</p>	5) Soldadura bruta, sem raio de transição.	
80	$\ell \leq 50 \text{ mm}$	 <p>6</p>  <p>7</p>	<u>Acessórios transversais:</u> 6) Soldados a uma chapa. 7) Reforços verticais soldados a uma viga laminada ou a uma viga composta.	<u>Pormenores 6) e 7):</u> As extremidades das soldaduras são cuidadosamente rectificadas para eliminar qualquer rebordo.
71	$50 < \ell \leq 80 \text{ mm}$		 <p>8</p> 	8) Diafragma de vigas em caixa soldado a um banzo ou a uma alma. Poderá não ser viável para secções tubulares pequenas. As categorias também são válidas para reforços em anel.
80		 <p>9</p>	9) Refere-se ao efeito no material de base dos conectores soldados.	

Quadro 8.5 – Ligações soldadas de transmissão de esforços

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo			Descrição	Requisitos
80	$\ell < 50 \text{ mm}$	qualquer t [mm]		<p><u>Ligações em cruz e em T:</u></p> <p>1) Rotura da base em todas as soldaduras de topo com penetração total e em todas as juntas de penetração parcial.</p>	<p>1) Após inspeção, isentas de descontinuidades ou de defeitos de alinhamento fora das tolerâncias da EN 1090.</p> <p>2) Para o cálculo de $\Delta\sigma$, utiliza-se a tensão nominal modificada.</p> <p>3) Nas ligações de penetração parcial, são requeridas duas verificações da fadiga. Em primeiro lugar, avalia-se a fissuração da raiz de acordo com as tensões definidas na secção 5, utilizando a categoria 36* para $\Delta\sigma_w$ e a categoria 80 para $\Delta\tau_w$. Em segundo lugar, avalia-se a fissuração superficial determinando $\Delta\sigma$ na chapa de apoio.</p>
71	$50 < \ell \leq 80$	qualquer t [mm]			
63	$80 < \ell \leq 100$	qualquer t [mm]			
56	$100 < \ell \leq 120$	qualquer t [mm]			
56	$\ell > 120$	$t \leq 20$			
50	$120 < \ell \leq 200$ $\ell > 200$	$t > 20$ $20 < t \leq 30$			
45	$200 < \ell \leq 300$ $\ell > 300$	$t > 30$ $30 < t \leq 50$			
40	$\ell > 300$	$t > 50$			
Como o pormenor 1) do Quadro 8.5				2) Rotura no bordo da base do acessório; a concentração de tensões nas extremidades das soldaduras é devida à flexibilidade da chapa de apoio.	<p><u>Pormenores 1) a 3):</u> A falta de alinhamento das chapas solicitadas não deverá exceder 15 % da espessura da chapa intermédia.</p>
36*				3) Rotura da base em soldaduras de topo em T com penetração parcial ou em soldaduras de ângulo e de topo em T, de acordo com a Figura 4.6 da EN 1993-1-8:2005.	
Como o pormenor 1) do Quadro 8.5	 <p>zona esforçada do painel principal: inclinação = 1/2</p>			<p><u>Ligações sobrepostas soldadas:</u></p> <p>4) Ligação sobreposta soldada com cordão de ângulo.</p>	<p>4) $\Delta\sigma$ na chapa principal calculado com base na área indicada no desenho.</p> <p>5) $\Delta\sigma$ calculado nas chapas sobrepostas.</p>
45*				<p><u>Chapa sobreposta:</u></p> <p>5) Ligação sobreposta soldada com cordão de ângulo.</p>	
	$t_c < t$	$t_c \geq t$		<p><u>Chapas de recobrimento sobre vigas laminadas e vigas compostas:</u></p> <p>6) Zonas de extremidade das chapas de recobrimento soldadas simples ou múltiplas, com ou sem soldadura frontal.</p>	<p>6) Se a chapa de recobrimento é mais larga do que o banzo, é necessária uma soldadura frontal. Esta soldadura deverá ser cuidadosamente rectificada para eliminar qualquer rebordo. O comprimento mínimo da chapa de recobrimento é de 300 mm. Para o efeito da dimensão dos elementos de ligação mais curtos, ver o pormenor 1).</p>
56*	$t \leq 20$	-			
50	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$			
45	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$			
40	$t > 50$	$30 < t \leq 50$			
36	-	$t > 50$			
56				<p>7) Chapas de recobrimento sobre vigas laminadas e vigas compostas.</p> <p>5t_c é o comprimento mínimo da soldadura reforçada.</p>	<p>7) Soldadura frontal aplanada rectificada à face. Além disso, se $t_c > 20 \text{ mm}$, a espessura da extremidade da chapa é rectificada com uma inclinação < 1 em 4.</p>

(continua)

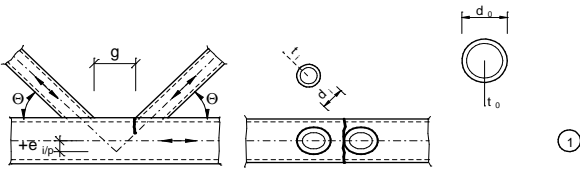
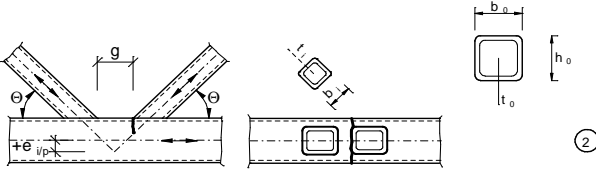
Quadro 8.5 – Ligações soldadas de transmissão de esforços (conclusão)

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
80 m=5	 	<p>8) Soldaduras de ângulo contínuas transmitindo corte, como nas soldaduras alma-banzo em vigas compostas.</p> <p>9) Ligação sobreposta soldada com cordão de ângulo.</p>	<p>8) $\Delta\tau$ calculado com base na área da secção bissectriz.</p> <p>9) $\Delta\tau$ calculado com base na área da secção bissectriz considerando o comprimento total da soldadura. Extremidades do cordão a mais de 10 mm do bordo da chapa, ver também 4) e 5) acima.</p>
ver a EN 1994-2 (90 m=8)		<p><u>Conectores de cabeça soldados:</u></p> <p>10) Para aplicações mistas</p>	<p>10) $\Delta\tau$ calculado a partir da secção transversal nominal do conector.</p>
71	 	<p>11) Ligação de um tubo a uma virola por soldaduras de topo com 80 % de penetração total.</p>	<p>11) Zona de concordância do cordão de soldadura rectificada. $\Delta\sigma$ calculado no tubo.</p>
40	 	<p>12) Ligação de um tubo a uma virola por soldaduras de ângulo.</p>	<p>12) $\Delta\sigma$ calculado no tubo.</p>

Quadro 8.6 – Secções tubulares ($t \leq 12,5$ mm)

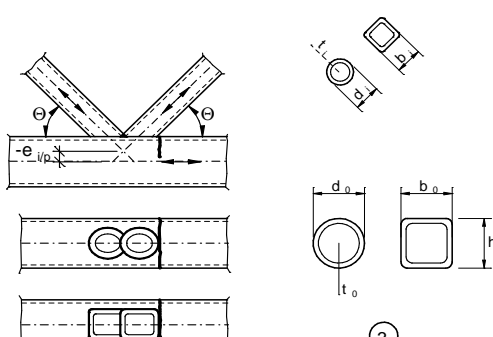
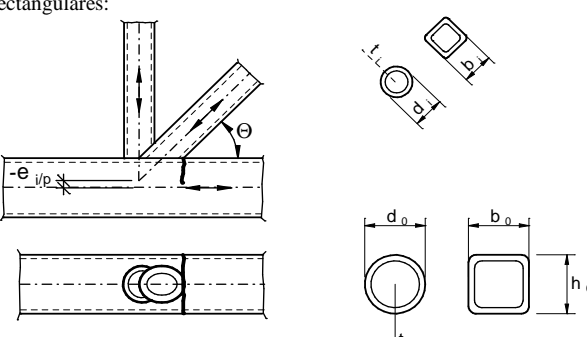
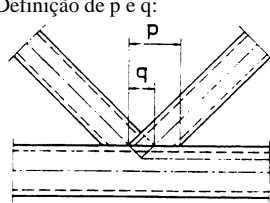
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Descrição	Requisitos
71			1) Ligação tubo-chapa, tubos achatados, soldadura de topo (chanfro em X).	1) $\Delta\sigma$ calculado no tubo. Válido apenas para tubos de diâmetro inferior a 200 mm.
71	$\alpha \leq 45^\circ$		2) Ligação tubo-chapa, tubo com entalhe e soldado à chapa. Furos na extremidade do entalhe.	2) $\Delta\sigma$ calculado no tubo. A fissuração por corte na soldadura deverá ser verificada utilizando o Quadro 8.5, pormenor 8).
63	$\alpha > 45^\circ$			
71			<u>Soldaduras transversais de topo:</u> 3) Ligações com soldaduras de topo de secções tubulares circulares.	<u>Pormenores 3) e 4):</u> <ul style="list-style-type: none">- Convexidade da soldadura ≤ 10 % da largura da soldadura, com transições suaves.- Soldaduras executadas na horizontal, revelando-se, após inspecção, isentas de defeitos fora das tolerâncias da EN 1090.- Classificar 2 categorias de pormenores acima se $t > 8$ mm.
56			4) Ligações com soldaduras de topo de secções tubulares rectangulares.	
71			<u>Acessórios soldados:</u> 5) Secção tubular circular ou rectangular, com ligação a outra secção por soldadura de ângulo.	5) <ul style="list-style-type: none">- Soldaduras que não transmitem esforços.- Largura paralela à direcção da tensão $\ell \leq 100$ mm.- Para outros casos, ver o Quadro 8.4.
50			<u>Emendas soldadas:</u> 6) Secções tubulares circulares, emendadas por soldaduras de topo numa chapa intermédia.	<u>Pormenores 6) e 7):</u> <ul style="list-style-type: none">- Soldaduras de transmissão de esforços.- Soldaduras revelando-se, após inspecção, isentas de defeitos fora das tolerâncias da EN 1090.- Classificar 1 categoria de pormenores acima se $t > 8$ mm.
45			7) Secções tubulares rectangulares, emendadas por soldaduras de topo numa chapa intermédia.	
40			8) Secções tubulares circulares, emendadas por soldaduras de ângulo numa chapa intermédia.	<u>Pormenores 8) e 9):</u> <ul style="list-style-type: none">- Soldaduras de transmissão de esforços.- Espessura da parede $t \leq 8$ mm.
36			9) Secções tubulares rectangulares, emendadas por soldaduras de ângulo numa chapa intermédia.	

Quadro 8.7 – Nós de vigas reticuladas

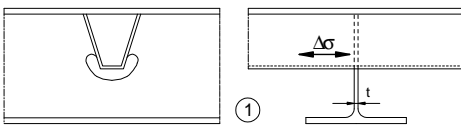
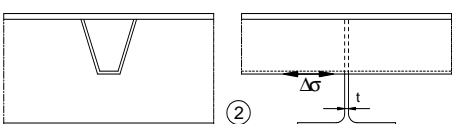
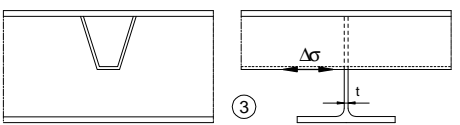
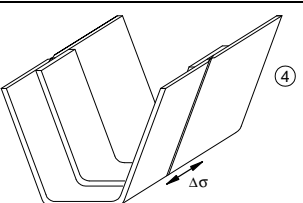
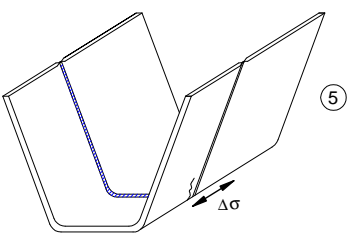
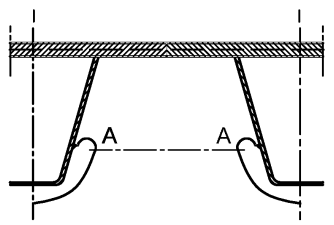
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Requisitos
90 m=5	$\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$	<p>Ligações com afastamento: Pormenor 1): Ligações em K e em N, secções tubulares circulares:</p>  <p>①</p>	<p><u>Pormenores 1) e 2):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Avaliações separadas para as cordas e os elementos diagonais. - Para valores intermédios da razão t_0/t_i, interpolar linearmente entre as categorias de pormenores. - São autorizadas soldaduras de ângulo em elementos diagonais com paredes de espessura $t \leq 8$ mm. - t_0 e $t_i \leq 8$ mm - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $b_0/t_0 \times t_0/t_i \leq 25$ - $d_0/t_0 \times t_0/t_i \leq 25$ - $0,4 \leq b_i/b_0 \leq 1,0$ - $0,25 \leq d_i/d_0 \leq 1,0$ - $b_0 \leq 200$ mm - $d_0 \leq 300$ mm - $-0,5h_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25h_0$ - $-0,5d_0 \leq e_{i/p} \leq 0,25d_0$ - $e_{o/p} \leq 0,02b_0$ ou $\leq 0,02d_0$ <p>[$e_{o/p}$ é a excentricidade fora do plano]</p> <p><u>Pormenor 2):</u> $0,5(b_0 - b_i) \leq g \leq 1,1(b_0 - b_i)$ e $g \geq 2t_0$</p>
45 m=5	$\frac{t_0}{t_i} = 1,0$		
71 m=5	$\frac{t_0}{t_i} \geq 2,0$	<p>Ligações com afastamento: Pormenor 2): Ligações em K e em N, secções tubulares rectangulares:</p>  <p>②</p>	
36 m=5	$\frac{t_0}{t_i} = 1,0$		

(continua)

Quadro 8.7 – Nós de vigas reticuladas (conclusão)

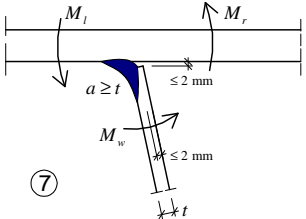
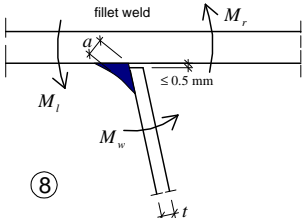
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Requisitos
71 m=5	<p>Ligações com sobreposição: Pormenor 3): Ligações em K, secções tubulares circulares ou rectangulares:</p>  <p>③</p>	<p>Pormenores 3) e 4):</p> <ul style="list-style-type: none"> - 30 % ≤ sobreposição ≤ 100 % - sobreposição = $(q/p) \times 100 \%$ - Avaliações separadas para as cordas e os elementos diagonais. - Para valores intermédios da razão t_o/t_i, interpolar linearmente entre as categorias de pormenores. - São autorizadas soldaduras de ângulo em elementos diagonais com paredes de espessura $t \leq 8 \text{ mm}$. - $t_o \text{ e } t_i \leq 8 \text{ mm}$ - $35^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ - $b_o/t_o \times t_o/t_i \leq 25$ - $d_o/t_o \times t_o/t_i \leq 25$ - $0,4 \leq b_i/b_o \leq 1,0$ - $0,25 \leq d_i/d_o \leq 1,0$ - $b_o \leq 200 \text{ mm}$ - $d_o \leq 300 \text{ mm}$ - $-0,5h_o \leq e_{i/p} \leq 0,25h_o$ - $-0,5d_o \leq e_{i/p} \leq 0,25d_o$ - $e_{o/p} \leq 0,02b_o \text{ ou } \leq 0,02d_o$ <p>[$e_{o/p}$ é a excentricidade fora do plano]</p>
56 m=5		
71 m=5	<p>Ligações com sobreposição: Pormenor 4): Ligações em N, secções tubulares circulares ou rectangulares:</p>  <p>④</p>	<p>Definição de p e q:</p> 
50 m=5		

Quadro 8.8 – Tabuleiros ortotrópicos – reforços de secção fechada

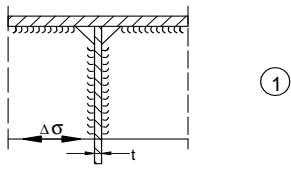
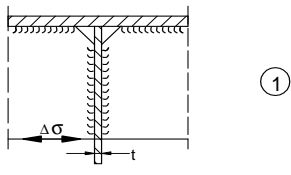
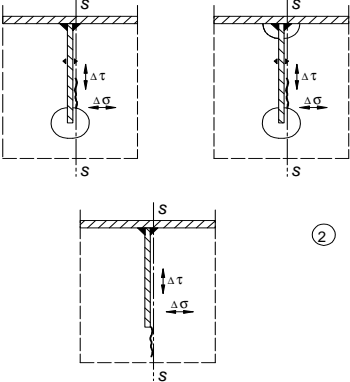
Categoria do pormenor	Pormenor construtivo		Descrição	Requisitos
80	$t \leq 12 \text{ mm}$		1) Reforço longitudinal contínuo, com recorte adicional na carlinga.	1) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ no reforço longitudinal.
71	$t > 12 \text{ mm}$			
80	$t \leq 12 \text{ mm}$		2) Reforço longitudinal contínuo, sem recorte adicional na carlinga.	2) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ no reforço.
71	$t > 12 \text{ mm}$			
36			3) Reforço longitudinal descontinuo de ambos os lados da carlinga.	3) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ no reforço.
71			4) Junta no reforço, soldadura de topo com penetração total com contrachapa de apoio de aço.	4) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ no reforço.
112	Como os pormenores 1), 2), 4) no Quadro 8.3		5) Soldadura de topo com penetração total nos dois lados do reforço, sem contrachapa de apoio.	5) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ no reforço. Soldaduras provisórias no interior das soldaduras de topo.
90	Como os pormenores 5), 7) no Quadro 8.3			
80	Como os pormenores 9), 11) no Quadro 8.3			
71			6) Secção crítica entre recortes na alma de uma carlinga.	6) Avaliação baseada no intervalo de tensões na secção crítica tendo em conta os efeitos Vierendeel. NOTA: No caso de o intervalo de tensões ser determinado de acordo com a EN 1993-2, 9.4.2.2(3), poderá utilizar-se a categoria de pormenor 112.

(continua)

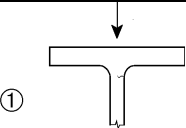
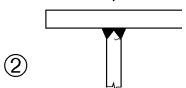
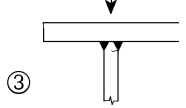
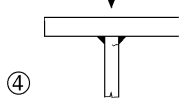
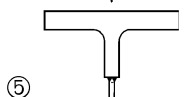
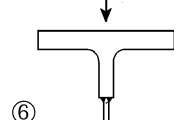
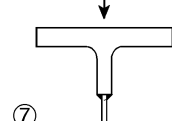
Quadro 8.8 – Tabuleiros ortotrópicos – reforços de secção fechada (conclusão)

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
71		<p><u>Soldadura de ligação da chapa do tabuleiro à nervura de secção trapezoidal ou em V</u></p> <p>7) Soldadura de penetração parcial com $a \geq t$.</p>	7) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais de flexão na chapa.
50		<p>8) Soldadura de ângulo ou soldaduras de penetração parcial não contemplada pelo pormenor 7).</p>	8) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais de flexão na chapa.

Quadro 8.9 – Tabuleiros ortotrópicos – reforços de secção aberta

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
80		1) Ligação de um reforço longitudinal a uma carlinga.	1) Avaliação baseada no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ no reforço.
71			
56		<p>2) Ligação de um reforço longitudinal contínuo a uma carlinga.</p> $\Delta\sigma = \frac{\Delta M_s}{W_{net,s}}$ $\Delta\tau = \frac{\Delta V_s}{A_{w,net,s}}$ <p>Verificar também o intervalo de tensões entre reforços como definido na EN 1993-2.</p>	<p>2) Avaliação baseada na combinação do intervalo de tensões de corte $\Delta\tau$ e no intervalo de tensões normais $\Delta\sigma$ na alma da carlinga, considerada como um intervalo de tensões equivalente:</p> $\Delta\sigma_{eq} = \frac{1}{2} \left(\Delta\sigma + \sqrt{\Delta\sigma^2 + 4\Delta\tau^2} \right)$

Quadro 8.10 – Ligações do banzo superior à alma de vigas de caminhos de rolamento

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
160		1) Secções laminadas em I ou em H.	1) Intervalo de tensões verticais de compressão $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na alma devido às cargas rolantes.
71		2) Soldadura de topo em T com penetração total.	2) Intervalo de tensões verticais de compressão $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na alma devido às cargas rolantes.
36*		3) Soldaduras de topo em T com penetração parcial, ou soldadura de topo em T com penetração total eficaz em conformidade com a EN 1993-1-8.	3) Intervalo de tensões $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na secção bissectriz da soldadura devido à compressão vertical das cargas rolantes.
36*		4) Soldaduras de ângulo.	4) Intervalo de tensões $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na secção bissectriz da soldadura devido à compressão vertical das cargas rolantes.
71		5) Banzo em T com soldadura de topo em T com penetração total.	5) Intervalo de tensões verticais de compressão $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na alma devido às cargas rolantes.
36*		6) Banzo em T com soldadura de topo em T com penetração parcial, ou soldadura de topo em T com penetração total eficaz em conformidade com a EN 1993-1-8.	6) Intervalo de tensões $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na secção bissectriz da soldadura devido à compressão vertical das cargas rolantes.
36*		7) Banzo em T com soldaduras de ângulo.	7) Intervalo de tensões $\Delta\sigma_{\text{vert}}$ na secção bissectriz da soldadura devido à compressão vertical das cargas rolantes.

Anexo A

(normativo)

Determinação dos parâmetros do carregamento de fadiga e dos formatos de verificação

A.1 Determinação dos casos de carregamento

(1) As sequências de carregamento tipo, que possam ser consideradas uma envolvente de todos os casos de carregamento de serviço previstos durante o tempo de vida à fadiga, deverão ser determinadas com base em casos anteriores de estruturas semelhantes, ver a Figura A.1 a).

A.2 Historial de tensões para o pormenor construtivo

(1) Deverá ser determinado um historial de tensões a partir dos casos de carregamento para o pormenor construtivo considerado, tendo em conta a natureza e a forma das linhas de influência relevantes e os efeitos de amplificação dinâmica, ver a Figura A.1 b).

(2) Os historiais de tensões também poderão ser determinados a partir de medições efectuadas em estruturas semelhantes ou a partir de análises dinâmicas da estrutura.

A.3 Contagem dos ciclos

(1) O historial de tensões poderá ser avaliado através de um dos seguintes métodos de contagem de ciclos:

- método da gota de água;
- método do reservatório, ver a Figura A.1 c);

para determinar:

- os intervalos de tensões e os seus números de ciclos;
- as tensões médias, quando é necessário ter em conta a sua influência.

A.4 Espectro dos intervalos de tensão

(1) O espectro dos intervalos de tensão deverá ser determinado classificando por ordem decrescente os intervalos de tensões e os correspondentes números de ciclos, ver a Figura A.1 d).

(2) Os espectros dos intervalos de tensão poderão ser modificados desprezando os valores de pico que representam menos de 1 % do dano total, assim como as tensões de baixa intensidade situadas abaixo do limite de truncatura.

(3) Os espectros dos intervalos de tensão poderão ser normalizados em função da sua forma, por exemplo com as coordenadas $\overline{\Delta\sigma} = 1,0$ e $\overline{\Sigma n} = 1,0$.

A.5 Ciclos até à rotura

(1) Quando se utiliza o espectro de cálculo, os intervalos de tensão aplicada $\Delta\sigma_i$ deverão ser multiplicados por γ_{Ff} e os valores da resistência à fadiga $\Delta\sigma_C$ deverão ser divididos por γ_{Mf} , a fim de obter a duração à fadiga N_{Ri} correspondente a cada patamar do espectro. O dano D_d para o valor de cálculo do tempo de vida deverá ser determinado a partir de:

$$D_d = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \quad (A.1)$$

em que:

n_{Ei} número de ciclos associados ao intervalo de tensões $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i$ para o patamar i do espectro ponderado;

N_{Ri} duração à fadiga (em ciclos) obtida a partir da curva ponderada $\frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} - N_R$ para um intervalo de tensões $\gamma_{Ff} \Delta\sigma_i$.

(2) Com base num dano equivalente a D_d , o espectro do intervalo de tensões de cálculo poderá ser transformado em qualquer espectro de intervalo de tensões de cálculo equivalente, por exemplo num espectro de intervalo de tensões de amplitude constante correspondente a uma acção de fadiga equivalente, Q_e , associada ao número de ciclos, $n_{max} = \sum n_i$, ou ainda a $Q_{E,2}$ associada ao número de ciclos $N_C = 2 \times 10^6$.

A.6 Formatos de verificação

(1) A avaliação da fadiga a partir do dano acumulado deverá satisfazer os seguintes critérios:

– na base do dano acumulado:

$$D_d \leq 1,0 \quad (A.2)$$

– na base do intervalo de tensões:

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} \leq \sqrt[m]{D_d} \frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}}, \text{ em que } m = 3 \quad (A.3)$$

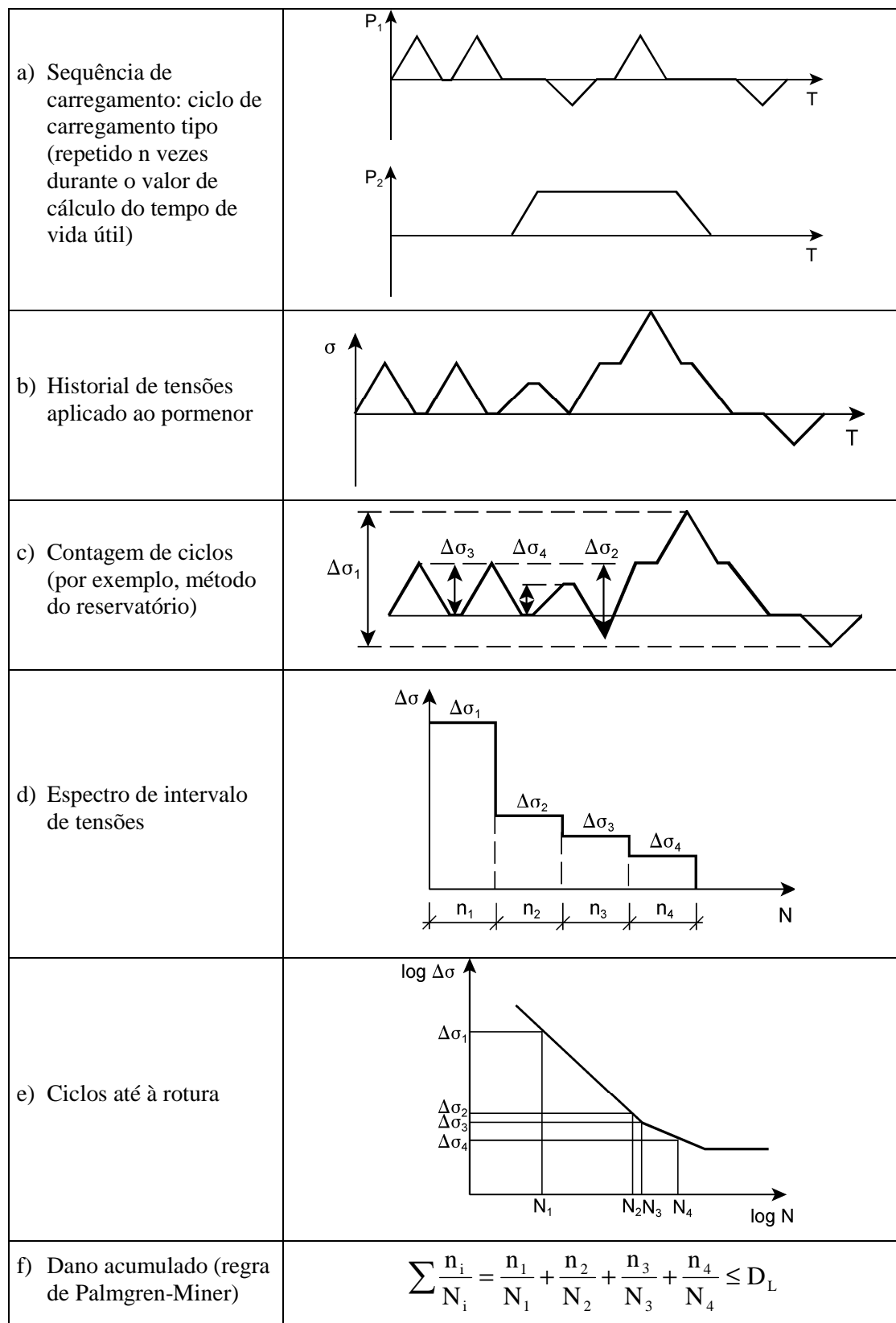


Figura A.1 – Método do dano acumulado

Anexo B

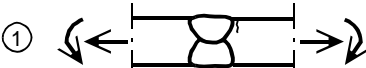

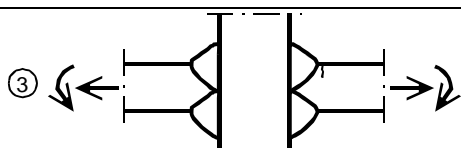
(normativo)

Resistência à fadiga em função da tensão geométrica (na zona termicamente afectada)

(1) Para a aplicação do método da tensão geométrica, o Quadro B.1 indica as categorias de pormenores para as fendas que se iniciam:

- na base de uma soldadura de topo;
- na base de acessórios com soldadura de ângulo;
- na base de uma soldadura de ângulo nas ligações em cruz.

Quadro B.1 – Categorias de pormenores para o método da tensão geométrica (na zona termicamente afectada)

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
112		1) Soldadura de topo com penetração total.	1) <ul style="list-style-type: none"> - Todas as soldaduras afagadas por máquina até à face da chapa paralelamente à direcção da seta. - Extensões de extremidade retirados após a soldadura. Bordos das chapas rectificadas por máquina na direcção das tensões. - Soldadura nos dois lados, controlada por NDT. - Para os efeitos de desalinhamento, ver a NOTA 1.
100		2) Soldadura de topo com penetração total.	2) <ul style="list-style-type: none"> - Soldadura não afagada por máquina. - Extensões de extremidade retirados após a soldadura. Bordos das chapas rectificadas por máquina até à face na direcção das tensões. - Soldadura nos dois lados. - Para os efeitos de desalinhamento, ver a NOTA 1.
100		3) Ligação em cruz com soldaduras de topo com penetração total em K.	3) <ul style="list-style-type: none"> - Ângulo da concordância do cordão de soldadura $\leq 60^\circ$. - Para os efeitos de desalinhamento, ver a NOTA 1.

(continua)

Quadro B.1 – Categorias de pormenores para o método da tensão geométrica (na zona termicamente afectada)
(conclusão)

Categoria do pormenor	Pormenor construtivo	Descrição	Requisitos
100		4) Soldaduras de ângulo que não transmitem esforços.	4) - Ângulo da concordância do cordão de soldadura $\leq 60^\circ$. - Ver também a NOTA 2.
100		5) Extremidades de acessórios, extremidades de reforços longitudinais.	5) - Ângulo da concordância do cordão de soldadura $\leq 60^\circ$. - Ver também a NOTA 2.
100		6) Extremidades de chapas de reforço do banzo e ligações semelhantes.	6) - Ângulo da concordância do cordão de soldadura $\leq 60^\circ$. - Ver também a NOTA 2.
90		7) Ligações em cruz com soldaduras de transferência de esforços.	7) - Ângulo da concordância do cordão de soldadura $\leq 60^\circ$. - Para os efeitos de desalinhamento, ver a NOTA 1. - Ver também a NOTA 2.

NOTA 1: O Quadro B.1 não inclui os efeitos de desalinhamento, os quais têm de ser explicitamente considerados na determinação das tensões.

NOTA 2: O Quadro B.1 não inclui a iniciação da fadiga a partir da raiz do cordão seguida de propagação na secção bissectriz.

NOTA 3: Para a definição do ângulo da concordância do cordão de soldadura, ver a EN 1090.

Anexo Nacional NA

Introdução

O presente Anexo Nacional foi elaborado no âmbito da actividade da Comissão Técnica Portuguesa de Normalização CT 115 – Eurocódigos Estruturais, cuja coordenação é assegurada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) na sua qualidade de Organismo de Normalização Sectorial (ONS) no domínio dos Eurocódigos Estruturais.

A inclusão de um Anexo Nacional na NP EN 1993-1-9:2010 decorre do disposto no Preâmbulo desta Norma.

NA.1 – Objectivo e campo de aplicação

Este Anexo Nacional estabelece as condições para a implementação, em Portugal, da NP EN 1993-1-9:2010 – “Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-9: Fadiga”, as quais se referem aos seguintes aspectos:

- a) Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP);
- b) informações complementares não contraditórias.

NA.2 – Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP)

NA.2.1 – Generalidades

Os Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP) relativos às Regras de Aplicação onde são permitidas opções nacionais são estabelecidos no Preâmbulo da presente Norma.

Nas secções NA.2.2 e NA.2.3 referem-se, respectivamente, as Regras de Aplicação sem prescrições a nível nacional e com prescrições a nível nacional. As prescrições a nível nacional, indicadas na secção NA.2.3, são referenciadas do mesmo modo que no corpo da Norma mas precedidas de “NA– “.

NA.2.2 – Regras de Aplicação sem prescrições a nível nacional

Relativamente a:

- 1.1(2), Nota 1
- 2(2)
- 2(4)
- 3(2)
- 3(7)
- 6.1(1)
- 6.2(2)
- 7.1(3)
- 7.1(5)
- 8(4)

prescinde-se de introduzir prescrições a nível nacional, devendo adoptar-se as correspondentes prescrições constantes desta Norma e, se tal for o caso, os procedimentos ou os valores aí recomendados.

NA.2.3 – Regras de Aplicação com prescrições a nível nacional

a) NA-5(2), Nota 2

Em vigas de alma cheia de estruturas de edifícios, a relação entre a altura e a espessura da alma não deve exceder o valor de 200.

NA.3 – Informações complementares

NA.3.1 – Objectivo

Na secção NA.3 são fornecidas informações complementares não contraditórias com as prescrições da presente Norma, visando auxiliar a aplicação desta Norma.

NA.3.2 – Informações gerais

a) Dispensa de verificação à fadiga

A verificação à fadiga é dispensável em estruturas de edifícios desde que não sujeitas a acções dinâmicas induzidas por equipamentos mecânicos ou a vibrações significativas devidas à acção do vento.

NA.4 – Correspondência entre as normas europeias referidas na presente Norma e as normas nacionais

Norma europeia	Norma nacional	Título
EN 1990:2002	NP EN 1990:2009	<i>Eurocódigo – Bases para o projecto de estruturas</i>
EN 1991-1-1:2002	NP EN 1991-1-1:2009	<i>Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-1: Acções gerais – Pesos volúmicos, pesos próprios, sobrecargas em edifícios</i>
EN 1991-1-2:2002	NP EN 1991-1-2:2010	<i>Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-2: Acções gerais – Acções em estruturas expostas ao fogo</i>
EN 1991-1-3:2003	NP EN 1991-1-3:2009	<i>Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-3: Acções gerais – Acções da neve</i>
EN 1991-1-4:2005	NP EN 1991-1-4:2010	<i>Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-4: Acções gerais – Acções do vento</i>
EN 1991-1-5:2003	NP EN 1991-1-5:2009	<i>Eurocódigo 1 – Acções em estruturas – Parte 1-5: Acções gerais – Acções térmicas</i>
EN 1993-1-1:2005	NP EN 1993-1-1:2010	<i>Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios</i>

Norma europeia	Norma nacional	Título
EN 1993-1-2:2005	NP EN 1993-1-2:2010	<i>Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-2: Regras gerais – Verificação da resistência ao fogo</i>
EN 1993-1-8:2005	NP EN 1993-1-8:2010	<i>Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-8: Projecto de ligações</i>
EN 1993-1-10:2005	NP EN 1993-1-10:2010	<i>Eurocódigo 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-10: Tenacidade dos materiais e propriedades segundo a espessura</i>